



UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

CONCEPTION DES ANTENNES PORTABLES OFF-BODY POUR LES  
COMMUNICATIONS SOUTERRAINES EN UTILISANT LES  
MÉTAMATÉRIAUX ET L'ALGORITHME GÉNÉTIQUE.

MÉMOIRE  
PRÉSENTÉ  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN TÉLÉCOMMUNICATIONS

PAR  
ABDELBAKI ZEGHDOUD

JUIN 2019



**Cégep** de l'Abitibi-Témiscamingue  
**Université** du Québec en Abitibi-Témiscamingue

### **Mise en garde**

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans Depositum, site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous.

L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre. Il est donc interdit de reproduire ou de publier en totalité ou en partie ce document sans l'autorisation de l'auteur.

### **Warning**

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue obtained the permission of the author to use a copy of this document for non-profit purposes in order to put it in the open archives Depositum, which is free and accessible to all.

The author retains ownership of the copyright on this document. Neither the whole document, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

## TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX . . . . .	vi
LISTE DES FIGURES . . . . .	vii
LISTE DES ABBRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES . . . . .	xiii
RÉSUMÉ . . . . .	xiv
ABSTRACT . . . . .	xvi
CHAPITRE I	
INTRODUCTION . . . . .	1
1.1 Motivation . . . . .	1
1.1.1 Réseau local sans fil (WLAN) . . . . .	2
1.1.2 Les bandes de fréquence . . . . .	3
1.2 Problématique . . . . .	4
1.3 Solutions proposées . . . . .	5
1.4 Objectifs . . . . .	5
1.4.1 Objectif général . . . . .	5
1.4.2 Objectifs spécifiques . . . . .	6
1.5 Hypothèses de recherche . . . . .	6
1.6 Contribution et Publication . . . . .	7
1.7 Méthodologie . . . . .	7
1.7.1 L'approche théorique . . . . .	7
1.7.2 La démarche suivie . . . . .	8
1.7.3 Le matériel utilisé . . . . .	10
CHAPITRE II	
GÉNÉRALITÉS SUR LES ANTENNES CORPORELLES . . . . .	11



2.1	Introduction . . . . .	11
2.2	Wireless Body Area Networks (WBAN) . . . . .	11
2.2.1	Applications des antennes off-body . . . . .	16
2.3	Antennes utilisées pour les communications off-body . . . . .	18
2.3.1	Les antennes dipôles . . . . .	18
2.3.2	Alimentation d'une antenne dipôle . . . . .	18
2.3.3	Avantages d'utilisation d'une antenne dipôle . . . . .	19
2.4	Les métamatériaux . . . . .	20
2.4.1	Les conducteurs parfaits . . . . .	20
2.4.2	Les conducteurs magnétiques artificiels CMA (AMC en anglais) . . . . .	21
2.5	L'algorithme génétique (AG) . . . . .	27
2.5.1	Introduction . . . . .	27
2.5.2	L'algorithme génétique . . . . .	27
2.5.3	Etat de l'art . . . . .	28
2.5.4	La fonction coût . . . . .	34
2.5.5	L'opération de croisement . . . . .	34
2.5.6	L'opération de mutation . . . . .	34
2.5.7	Choix des paramètres de l'AG . . . . .	35
2.5.8	Programmation VBA . . . . .	36
2.6	Conclusion . . . . .	37
CHAPITRE III		
CONCEPTION PAR L'UTILISATION DES MÉTAMATÉRIAUX AMC SUR LE CORPS HUMAIN . . . . .		38
3.1	Conception de l'antenne . . . . .	39
3.1.1	L'antenne dipôle . . . . .	39

3.2	L'alimentation de l'antenne dipôle . . . . .	42
3.2.1	Alimentation par Balun . . . . .	42
3.2.2	Alimentation par une ligne microstrip : . . . . .	44
3.3	Antenne dipôle avec structure AMC . . . . .	47
3.3.1	L'antenne référence . . . . .	48
3.3.2	Conception de l'antenne . . . . .	52
3.4	Essais sur le corps humain . . . . .	53
3.4.1	Modèle du bras humain . . . . .	54
3.5	Résultats de simulation . . . . .	54
3.5.1	Gain . . . . .	55
3.5.2	Débit d'absorption spécifique (SAR) . . . . .	55
3.6	Conclusion . . . . .	56
CHAPITRE IV		
OPTIMISATION DE L'ANTENNE YAGI-UDA PAR L'ALGORITHME GÉ- NÉTIQUE . . . . .		57
4.1	Introduction . . . . .	57
4.2	Méthodologie suivie . . . . .	58
4.2.1	Optimisation de l'antenne référence . . . . .	58
4.2.2	Optimisation de l'antenne référence . . . . .	60
4.3	Application de l'algorithme génétique . . . . .	61
4.3.1	Sur le réflecteur . . . . .	62
4.3.2	Sur le directeur . . . . .	62
4.4	Résultats de simulation . . . . .	63
4.4.1	Cas du réflecteur . . . . .	63
4.4.2	Cas du directeur . . . . .	64
4.5	discussion . . . . .	67

4.5.1	Optimisation du réflecteur . . . . .	67
4.5.2	Optimisation du directeur . . . . .	67
4.6	Généralisation pour plusieurs directeurs . . . . .	68
4.6.1	Etude SAR . . . . .	72
4.7	Conclusion . . . . .	73
CHAPITRE V		
CONCLUSION GÉNÉRALE . . . . .		74

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
2.1 Amélioration du gain en fonction du nombre des cellules AMC utilisées. . . . .	25
3.1 Tableau résumant les paramètres inspirés de [35]. . . . .	46
3.2 Tableau résumant les valeurs des paramètres de la cellule AMC proposés par [17]. . . . .	51
3.3 Tableau résumant les valeurs des paramètres de l'antenne avec AMC. . . . .	51
4.1 Tableau résumant les paramètres optimisés de l'antenne Yagi-Uda.	60
4.2 Tableau résumant les paramètres optimisés de l'antenne Yagi-Uda.	72

## LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1.1 Exemple d'un WLAN [3] . . . . .	3
1.2 Illustration des bandes de fréquences ISM. Ces bandes de fréquences peuvent être utilisées sans licence [5]. . . . .	4
1.3 Processus d'optimisation en utilisant CST. . . . .	8
1.4 Optimisation des antennes en utilisant l'algorithme génétique. . .	9
2.1 Exemple d'un WBAN . . . . .	12
2.2 Exemple de la communication In-Body . . . . .	12
2.3 L'architecture des antennes In-Body. a) Implant sous la peau b) Implant sous forme de capsule pour les tissus profonds [11]. . .	13
2.4 Simulation du coefficient de réflexion $S_{11}$ de l'antenne proposée par [11]. . . . .	14
2.5 Exemple du système de communication On-Body . . . . .	14
2.6 Illustration des différents types de communication WBAN dont une entre un compteur de pas et une montre intelligente [12]. . .	15
2.7 Exemple de la communication Off-Body . . . . .	16
2.8 Structure de l'antenne bouton [6]. . . . .	16
2.9 Résultats de simulations et de mesures de l'antenne bouton sur le corps et dans l'espace libre [6]. . . . .	17
2.10 Alimentation d'une antenne dipôle par un balun [17]. . . . .	19
2.11 L'effet de la courbure sur la géométrie d'une antenne dipôle. . . .	20

2.12 Structure des MSRRs circulaires (à gauche) et carrées (à droite) [20]. . . . .	22
2.13 Antenne dipôle sur une matrice $7 \times 7$ d'éléments MSRRs [20]. . . . .	22
2.14 Résultat de simulation de la directivité de l'antenne proposée dans [20]. a) Structure à $7 \times 7$ cellules AMC. b) Structure à $9 \times 9$ cellules AMC. . . . .	23
2.15 Coefficient de réflexion de l'antenne proposée par [20]. . . . .	23
2.16 Structure AMC carrée utilisée dans [21]. . . . .	24
2.17 Réalisation de l'antenne UWB sur une matrice $4 \times 4$ d'éléments AMC [21]. . . . .	24
2.18 Diagramme de rayonnement mesuré dans le plan E de l'antenne [21]. (a) 1.575 GHz (b) 1.710 GHz (c) 2.0 GHz (d) 5.84 GHz . . . . .	25
2.19 Structure de l'antenne dipôle sur une matrice $4 \times 6$ d'éléments AMC sous forme d'haltères [22]. . . . .	26
2.20 Structure de l'antenne dipôle sur une matrice $5 \times 6$ d'éléments AMC sous forme d'haltères [17]. . . . .	26
2.21 Résultats de mesures et de simulation de l'antenne dipôle avec une structure AMC sous forme d'haltères [17]. . . . .	27
2.22 Différentes étapes de l'optimisation par l'AG. . . . .	28
2.23 Coefficient de réflexion de l'antenne proposée par [28]. . . . .	29
2.24 Antenne proposée par [28]. (a) Avant l'optimisation (b) Après l'optimisation. . . . .	29
2.25 Antenne proposée dans [29]. (a) Avant l'optimisation (b) Après l'optimisation. . . . .	30
2.26 Coefficient de réflexion de l'antenne proposée par [29]. . . . .	30
2.27 Antenne proposée par [30]. (a) Avant l'optimisation (b) Après l'optimisation. . . . .	31

2.28 Coefficient de réflexion de l'antenne [30]. . . . .	31
2.29 Antenne proposée par [31]. (a) Avant l'optimisation (b) Après l'optimisation. . . . .	32
2.30 Coefficient de réflexion de l'antenne proposée par [31]. . . . .	32
2.31 Antenne proposée par [32]. (a) Avant l'optimisation (b) Après l'optimisation. . . . .	33
2.32 Coefficient de réflexion de l'antenne [32]. . . . .	33
2.33 Illustration de l'opération de croisement. . . . .	35
3.1 Structure d'un dipôle simple. . . . .	39
3.2 Coefficient de réflexion de l'antenne dipôle en fonction de sa longueur. . . . .	40
3.3 Coefficient de réflexion de l'antenne dipôle pour $L = 21.9$ mm. . .	40
3.4 Diagramme de rayonnement d'un dipôle simple dans le plan H. .	41
3.5 Diagramme de rayonnement d'un dipôle simple dans le plan E. .	41
3.6 Antenne dipôle alimentée par une structure balun. . . . .	42
3.7 Antenne dipôle alimentée par une structure balun. . . . .	43
3.8 Coefficient de réflexion de l'antenne dipôle proposée. . . . .	44
3.9 Diagramme de rayonnement simulé de l'antenne alimentée par un Balun dans le plan E. . . . .	44
3.10 Diagramme de rayonnement simulé de l'antenne alimentée par un Balun dans le plan H. . . . .	45
3.11 L'antenne référence. . . . .	45
3.12 Dimensions de l'antenne. . . . .	46
3.13 Coefficient de réflexion de l'antenne optimisée. . . . .	46
3.14 Coefficient de réflexion de l'antenne en fonction de $L_{dri1}$ . . . . .	47

3.15 Gain réalisé maximum de l'antenne en fonction de $L_{dri1}$ . . . . .	48
3.16 Structure de l'antenne référence montée sur la surface AMC. . . .	49
3.17 Vue de profil de la structure de l'antenne de référence. . . . .	49
3.18 Coefficient de réflexion de l'antenne référence en fonction de $L$ . .	50
3.19 Structure d'un élément de l'AMC. . . . .	50
3.20 Vue de profil de la structure de l'antenne référence montée sur la surface AMC. . . . .	51
3.21 Antenne dipôle courbée sur le modèle du bras humain. . . . .	52
3.22 Coefficient de réflexion de l'antenne dipôle courbée sur le mo- dèle du bras humain. . . . .	52
3.23 Conception des éléments de l'antenne. (a)- Structure optimisée de l'élément de l'AMC et du dipôle. (b)-Structure de l'antenne double dipôle montée sur la surface AMC. . . . .	53
3.24 Structure de l'antenne repliée montée sur la surface AMC. . . . .	53
3.25 Résultats simulés du coefficient de réflexion avant et après la courbure. . . . .	54
3.26 Résultat de simulation du gain réalisé avant et après la courbure.	55
3.27 Résultat de la simulation du SAR sur un modèle de bras humain de rayon 51 mm. . . . .	56
4.1 Structure d'une antenne dipôle. . . . .	59
4.2 Diagramme de rayonnement de l'antenne dipôle. . . . .	59
4.3 Structure de l'antenne référence optimisée. . . . .	60
4.4 Simulation du diagramme de rayonnement de l'antenne référence.	61
4.5 Structure du réflecteur de l'antenne Yagi-Uda subdivisée. . . . .	62
4.6 Structure du réflecteur de l'antenne Yagi-Uda optimisée. . . . .	62



4.7	Structure du directeur de l'antenne Yagi-Uda subdivisée. . . . .	63
4.8	Structure du directeur de l'antenne Yagi-Uda optimisée. . . . .	63
4.9	Coefficient de réflexion $S_{11}$ de l'antenne Yagi-Uda avant et après optimisation par l'AG. . . . .	64
4.10	Diagramme de rayonnement du gain réalisé de l'antenne Yagi-Uda après optimisation par l'AG. . . . .	65
4.11	Simulation du coefficient de réflexion $S_{11}$ de l'antenne Yagi-Uda avant et après optimisation par l'AG. . . . .	65
4.12	Simulation du diagramme de rayonnement du gain réalisé de l'antenne Yagi-Uda après optimisation par l'AG. . . . .	66
4.13	Diagramme de rayonnement du gain réalisé de l'antenne Yagi-Uda avant et après optimisation du réflecteur par l'AG. . . . .	67
4.14	Diagramme de rayonnement du gain réalisé de l'antenne Yagi-Uda avant et après optimisation du directeur par l'AG. . . . .	68
4.15	Conception de l'antenne avec 5 directeurs. . . . .	69
4.16	Résultat de la simulation du coefficient de réflexion des antennes avec des directeurs complets. . . . .	69
4.17	Résultat de simulation du coefficient de réflexion des antennes avec des directeurs modifiés par l'AG. . . . .	70
4.18	Résultat de simulation du diagramme de rayonnement du gain réalisé des antennes avec des directeurs complets. . . . .	70
4.19	Résultat de la simulation du diagramme de rayonnement du gain réalisé des antennes avec des directeurs modifiés par l'AG. . . . .	71
4.20	Résultat de la simulation du gain réalisé avant et après modification des directeurs par l'AG. . . . .	71
4.21	Résultat de la simulation de la différence dans le gain après l'introduction des directeurs modifiés par l'AG. . . . .	72

4.22 Résultat de la simulation du SAR pour l'antenne avec 4 directeurs modifiés par l'AG. . . . .	73
---	----

## LISTE DES ABBRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network
<b>WBAN</b>	Wireless Body Area Network
<b>SAR</b>	Specific absorbtion rate (Débit d'absorption spécifique) (W/Kg)
<b>AMC</b>	Artificial Magnetic Conductor (Conducteur Magnétique Artificiel)
<b>AG</b>	Algorithme Génétique
<b>CEP</b>	Conducteur Electrique Parfait
<b>CMP</b>	Conducteur Magnétique Parfait
<b>MSRR</b>	Multiple Split-Ring Resonator
<b>VSWR</b>	Voltage Standing Wave Ratio
$\epsilon_0$	Permittivité du vide
$\lambda$	Longueur d'onde (m)
$Hz$	Hertz
$Z_{in}$	Impédance d'entrée
$\epsilon_r$	Permittivité relative
$\epsilon_{err}$	Permittivité effective
$f$	fréquence

## RÉSUMÉ

Les antennes corporelles off-body sont de plus en plus utilisées dans les réseaux de communication à proximité du corps humain. Dans le domaine minier, ces antennes peuvent jouer un rôle crucial dans la sécurité des mineurs. En fait, elles peuvent être utilisées pour communiquer des informations sur les variables vitales comme le nombre des battements de cœur et la température du corps. Ce qui peut faire la différence dans une situation critique. Par contre, ces antennes peuvent représenter une source de radiations pouvant compromettre la santé des personnes qui les portent en cas de mauvaise conception des antennes.

Dans le présent travail, on propose de développer des antennes portables sur les vêtements avec un gain élevé tout en immunisant le corps humain des méfaits des rayonnements. Premièrement, on donne quelques conceptions d'antennes dipôles destinées à l'utilisation dans les mines souterraines. La première avec une alimentation Balun, la deuxième avec une alimentation micro-ruban et la troisième munie d'une surface AMC composée d'éléments en forme d'haltères pour les applications WBAN. Les résultats de la simulation de l'antenne avec structure AMC sur un bras humain (de rayon 51 mm) du coefficient de réflexion et du taux d'absorption spécifique (SAR) dans le cas de courbure de l'antenne sont présentés et discutés.

Dans un deuxième axe, on applique l'algorithme génétique pour améliorer le gain d'une antenne Yagi-Uda. L'antenne utilisée est à gain maximum (optimisée par les méthodes classiques). On a obtenu une amélioration de 0.13 dBi dans le cas de l'optimisation du directeur et de 0.33 dBi dans le cas de l'optimisation du réflecteur. Donc, l'algorithme génétique peut être utilisé pour l'amélioration du gain d'antennes utilisées dans les systèmes de communication sans fil.

D'une part, on a réussi à présenter quelques antennes destinées aux applications des communications Off-Body avec un bon gain et un minimum de rayonnement indésirables vers le corps humain. D'autre part, on a appliqué la méthode génétique pour améliorer davantage le gain d'une antenne Yagi-Uda avec un maximum de gain par les méthodes classiques. Donc, ces antennes sont convenables pour être utilisées dans les communications sans-fils dans une mine souterraine.

**Mots clés :** Mine, Off-Body, Antenne portable, Antenne dipôle, Communication sans fil, WBAN, SAR, Courbure, Algorithme génétique, Yagi-Uda, Directeur, Réflecteur, Métamatériaux, AMC

## ABSTRACT

Off-body antennas are increasingly used in wireless body area networks WBAN. In the mining sector, these antennas can play a crucial role in the safety of miners. In fact, they can be used to communicate information about vital variables such as body temperature. Which can be a matter of life or death in critical situations. On the other hand, these antennas can represent a source of radiations jeopardising the health of the person wearing the antenna if it was poorly designed.

In the present work, we propose wearable antennas. These antennas can be incorporated into clothing and have high gain while immunizing the human body from the harmful effects of radiation. First, we present some designs of dipole antennas for use in underground environments. The first is fed with a Balun structure, and the second with a microstrip line and the third equipped with an AMC surface composed of dogbone-shaped (dumbbell) elements for WBAN applications. Simulation results of the antenna with AMC structure on a human arm (radius 51 mm) of the reflection coefficient and the specific absorption rate (SAR) in the case of curvature of the antenna are presented and discussed.

Second, we apply the genetic algorithm to improve the gain of a Yagi-Uda antenna. The used antenna is at maximum gain and is optimized by conventional methods. By introducing the genetic algorithm, we were able to have an improvement of 0.13 dBi in the case of the optimization of the director and 0.33 dBi in the case of the optimization of the reflector. Thus, the genetic algorithm can be used to improve antenna gain used in wireless communication systems.

To begin with, we have managed to present some antennas for applications to Off-Body antennas with a good gain and a minimum of harmful radiation to the human body. In addition, the genetic algorithm has been applied to further improve the gain of a Yagi-Uda antenna with maximum gain by conventional methods. Therefore, these antennas are suitable for use in wireless communications in an underground mine.

**Keywords :** Mine, Off-Body, Portable Antenna, Dipole Antenna, Wireless Communication, WBAN, SAR, Curvature, Genetic Algorithm, Yagi-Uda, Director,

Reflector, Metamaterials, AMC

## CHAPITRE I

### INTRODUCTION

#### 1.1 Motivation

Le domaine des mines est très profitable au Canada, mais le milieu minier est un milieu difficile et plein de risques. En fait, des réglementations sont mises en œuvre pour minimiser le nombre d'accidents, on cite la formation FMTM (pour accéder à une mine). Par contre, le mineur peut être soumis à l'influence des gazes toxiques sans même le savoir. On cite le cas du monoxyde de carbone CO, un gaz sans couleur et sans odeur, qui est très dangereux pour la santé et peut même entraîner la mort. Dans ces cas, un système de supervision en tout temps est requis pour surveiller l'état de santé des mineurs en temps réel [1]. Cela permet aussi de suivre les variations de différents paramètres pouvant influencer le bon déroulement du travail aussi bien que le bien-être des mineurs. Pour cela, peuvent être installés pour détecter les paramètres d'environnement et des paramètres vitaux pour la santé des mineurs. Toutefois, il faut faire parvenir ces informations à un centre de surveillance qui serait capable de les traiter en temps réel et de donner des alertes de sécurité avant qu'une situation critique ne survienne.

Pour transmettre ces informations, il faut déployer un système de communication sans fil fiable et sécuritaire [1]. D'où, la nécessité de fabriquer des antennes



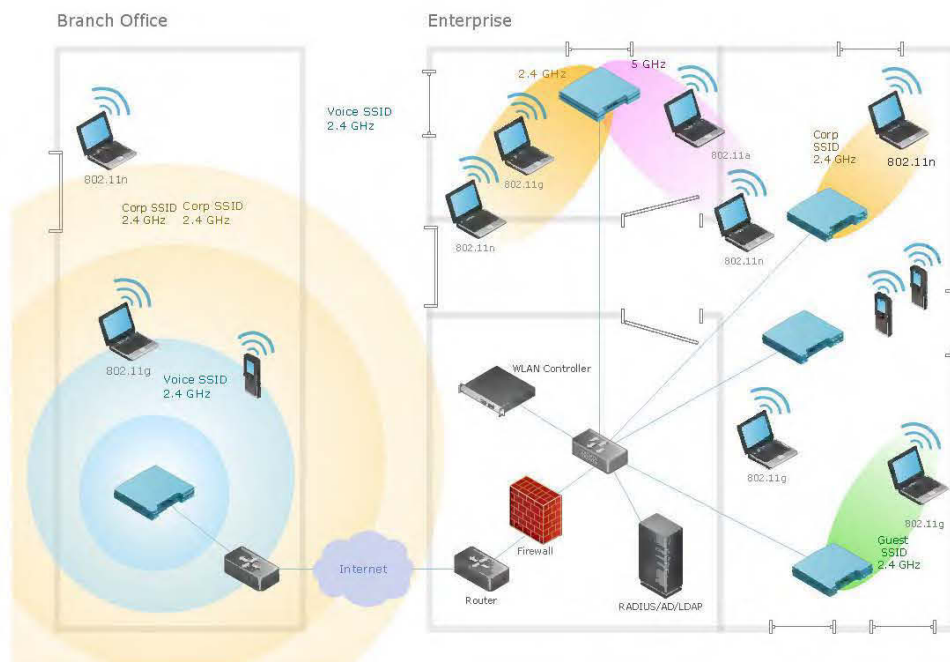
pouvant assurer un tel transfert de données de la façon la plus fiable et la plus rapide possible.

Pour cela, on propose de développer des antennes portables sur les vêtements avec un gain élevé tout en immunisant le corps humain des méfaits des rayonnements.

#### 1.1.1 Réseau local sans fil (WLAN)

Un réseau local sans fil (WLAN) relie deux périphériques ou plus à l'aide d'une communication sans fil. Cela donne aux utilisateurs la possibilité de se déplacer dans une zone de couverture locale tout en restant connectés au réseau. Tout comme le téléphone sans fil permet aux gens de passer des appels de n'importe où chez eux, un WLAN leur permet d'utiliser leur ordinateur n'importe où dans la zone réseau, comme un immeuble de bureaux ou dans un campus. En raison de leur facilité d'installation et de la popularité croissante des ordinateurs portables, les WLAN ont été largement déployés au cours des deux dernières décennies [2].

Les WLAN offrent une plus grande flexibilité et une plus grande portabilité que les réseaux locaux câblés. Contrairement à un réseau local traditionnel, qui requiert des câbles pour connecter l'ordinateur d'un utilisateur au réseau, un réseau local sans fil connecte les ordinateurs et d'autres composants au réseau à l'aide d'un périphérique AP. Un point d'accès communique avec des périphériques équipés d'adaptateurs réseau sans fil ; il se connecte à un réseau local Ethernet câblé via un port RJ-45. Le dispositif AP couvre généralement des zones allant jusqu'à 100 mètres [4]. Cette zone de couverture s'appelle une cellule. Les utilisateurs peuvent se déplacer librement dans la cellule avec leur ordinateur portable ou un autre périphérique réseau.



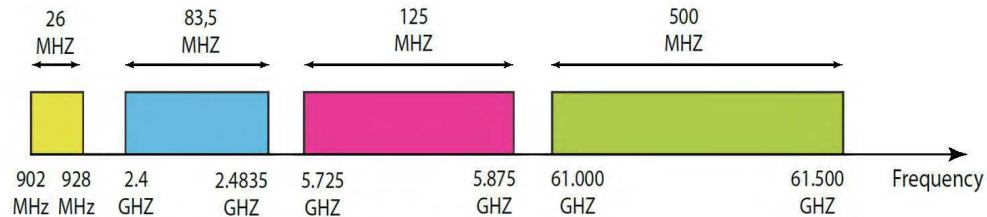
**Figure 1.1:** Exemple d'un WLAN [3]

### 1.1.2 Les bandes de fréquence

Le premier facteur à considérer lors du choix de la technologie sans fil est la bande de fréquence. La bande de fréquences est une ressource limitée et elle est réglementée différemment d'un pays à un autre. Pour chaque utilisation différente, certaines fréquences spécifiques peuvent être utilisées.

**Bandes industrielles, scientifiques et médicales (ISM)** Les bandes industrielles, scientifiques et médicales (ISM) sont des bandes de fréquences pouvant être utilisées sans licence. La technologie sans fil la plus répandue, telle que le WiFi, le Bluetooth, la communication en champ proche (NFC) et les micro-ondes, fonctionne dans cette bande. Cela signifie que la bande ISM est encombrée de nombreuses données transmises par les appareils utilisant ces

technologies sans fil. La Figure 1.2 montre les différentes bandes ISM.



**Figure 1.2:** Illustration des bandes de fréquences ISM. Ces bandes de fréquences peuvent être utilisées sans licence [5].

## 1.2 Problématique

Les antennes corporelles (Off-body antennas) sont placées sur les vêtements des mineurs dans le but de transmettre les informations vitales telles que ; le nombre de battements de cœur par minute, la pression sanguine, la température corporelle... etc., ainsi des informations sur le milieu minier telles que ; la température ambiante, la pression atmosphérique, la teneur de l'air en gaz toxiques. À vrai dire, plusieurs antennes ont déjà été proposés à ces fins, on peut citer les monopoles verticaux [6], des monopoles microruban [7], des antennes F inversées [8], des antennes à cavités et des antennes planes à fente alimentées par un guide d'onde [9]. Cependant, ces antennes ont présenté au moins un des problèmes suivants :

- Largeur de bande très étroite ;
- Dimensions élevées, ce qui les rendent encombrantes ;
- Rayonnement important vers le corps (on ne règle pas un problème en créant un autre) ;
- Stabilité des paramètres lors de la courbure des antennes corporelles off-body.

Dans notre étude, on essaie d'éviter les problèmes cités en concevant des antennes off-body avec des méthodes qui vont être discutées dans

les chapitres suivants.

### 1.3 Solutions proposées

Dans cette présente étude, on a développé de nouvelles techniques pour éviter les problèmes sus-cités. En d'autres termes, on a conçu des antennes ayant comme caractéristiques :

- Une bonne adaptation d'impédance dans la bande de fréquence désirée ;
- Un bas profil ;
- Un bon gain ;
- Et capable de conserver ces performances lors de la courbure corporelles (off-body).

En premier lieu, on utilisera l'algorithme génétique pour optimiser le gain des antennes, tout en conservant une bonne adaptation d'impédance. On fera ensuite une étude complémentaire afin de satisfaire la condition de stabilité des performances de l'antenne lors de la courbure corporelles . On propose des antennes dipôles et antennes Yagi qui sont moins susceptibles aux courbures à cause de leur géométries.

### 1.4 Objectifs

#### 1.4.1 Objectif général

On cherche à concevoir des antennes avec de bonnes performances. D'abord, on essaie d'obtenir un gain élevé avec un diagramme de rayonnement directif (broadside) favorisant ainsi la détection même des signaux les plus faibles dans la direction verticale au corps humain. Ensuite, une impédance d'entrée adaptée au circuit dans la fréquence de travail impliquant un minimum de ré-

flexion au niveau de l'antenne. Également, une petite taille rendant l'antenne moins encombrante lors de l'intégration sur les vêtements des mineurs. On cherche aussi à avoir un minimum de niveau SAR (Le SAR est la mesure du ratio entre la puissance émise d'une antenne en watts et la masse exposée de tissu humain en Kg) ce qui protège le corps des méfaits de rayonnement. Et finalement, il faut que l'antenne garde ces performances lors de courbure sur le corps humain.

#### 1.4.2 Objectifs spécifiques

Afin d'atteindre ces objectifs, on utilise des métamatériaux, les AMC (Les AMC sont des structures périodiques imitant le fonctionnement des conducteurs magnétiques parfaits dans une certaine fréquence) en particulier, pour augmenter davantage le gain d'une antenne dipôle, d'une part, et d'autre part, c'est d'isoler l'antenne du corps humain. À cause de la géométrie de l'antenne dipôle, elle reçoit moins de courbures quand elle est dirigée d'une façon parallèle à l'axe de courbure.

#### 1.5 Hypothèses de recherche

Une antenne dipôle possède une structure linéique, ce qui veut dire qu'elle ne présentera aucune courbure sur le corps humain si on la place d'une façon parallèle à l'axe de courbure. On estime que cela va diminuer l'effet de la sensibilité de l'antenne à la courbure, résultant ainsi en une stabilité des performances de cette dernière.

Dans un deuxième axe, les Conducteurs Magnétiques Artificiels (AMC), qui sont l'équivalent d'un conducteur magnétique parfait (PMC) [10], sont utilisés à la fois pour avoir un bas profil de l'antenne, un gain élevé et une protection

du corps humain (shielding). Premièrement, les AMC peuvent être placés très proche de l'antenne, ce qui réduit les dimensions de cette dernière. Deuxièmement, elles transforment le diagramme de rayonnement de l'antenne dipôle d'un diagramme omnidirectionnel en un diagramme directif (broadside), ce qui augmente le gain. Finalement, le fait de se comporter comme un mur magnétique (PMC) veut dire que les rayonnements sont réfléchis, ce qui protège le corps humain des radiations.

## 1.6 Contribution et Publication

Les travaux issus de mémoire ont fait objet de deux articles de conférence : (les articles devront être modifiés sous format IEEE)

- A. Zeghdoud and M. Nedil. Off-Body Dipole Antenna with Dogbone-Shaped AMC Bending on the Human Arm. *2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*. (Accepté )
- A. Zeghdoud, M. C. Derbal and M. Nedil. Gain Optimization of a Yagi-Uda Antenna using the Genetic Algorithm. *2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*. (Accepté )

## 1.7 Méthodologie

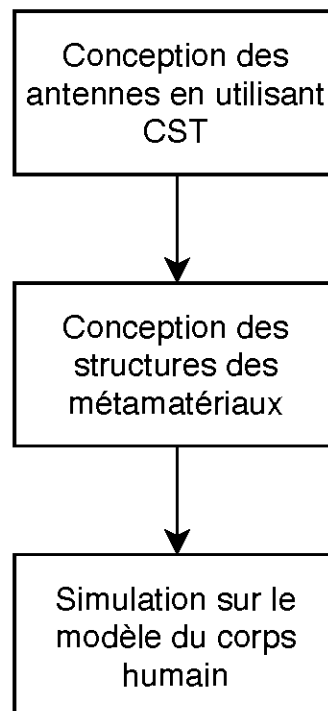
### 1.7.1 L'approche théorique

Au deuxième chapitre, on introduit une vue globale sur les antennes corporelles (off-body) puis décrire le fonctionnement des métamatériaux et de l'algorithme génétique. On présente aussi l'état de l'art des antennes corporelles et des applications de l'algorithme génétique dans l'optimisation des antennes. Dans le troisième chapitre, on se concentre sur l'optimisation de l'antenne opérant dans la fréquence 5.8 GHz (de Wi-Fi) en utilisant les AMC, et on fait des tests

de courbure sur le corps humain. Au quatrième chapitre, on évalue aussi les performances de l'antenne en termes de gain réalisé et du SAR. Ensuite, on applique la méthode génétique pour optimiser l'antenne et les métamatériaux. On utilise l'algorithme génétique pour, à la fois, d'augmenter le gain et garder une bonne adaptation d'impédance. Pour cela, on essaie de choisir des fonctions coût « fitness » qui vont faire converger l'algorithme vers les résultats désirés. Finalement, les résultats obtenus seront discutés et commentés avec une conclusion générale.

### 1.7.2 La démarche suivie

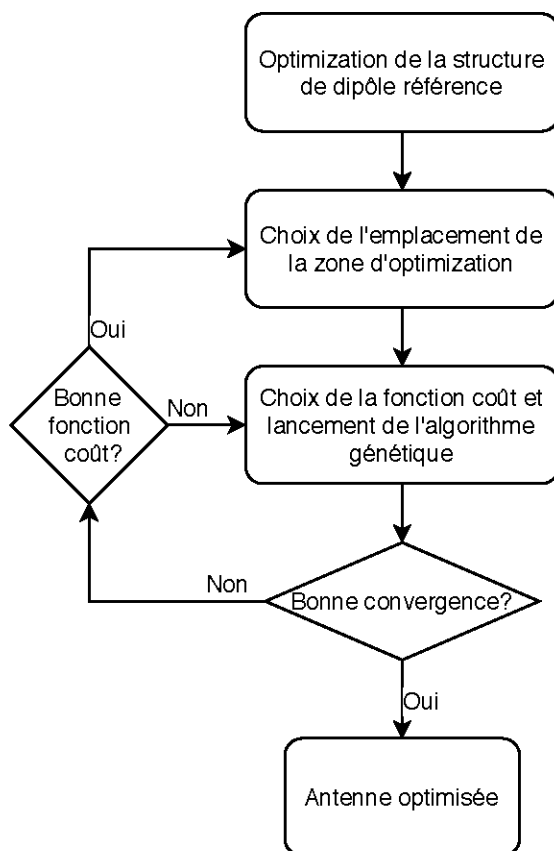
Le diagramme 1.3 montre la démarche suivie lors de la conception des antennes sous le logiciel de conception CST Microwave Studio.



**Figure 1.3:** Processus d'optimisation en utilisant CST.

La démarche suivie pour l'application de l'AG afin d'atteindre les objectifs de

ce projet de recherche est montrée sur le diagramme 1.4.



**Figure 1.4:** Optimisation des antennes en utilisant l'algorithme génétique.



### 1.7.3 Le matériel utilisé

Ce projet de recherche est basé principalement sur les simulations faites sur le logiciel CST Microwave Studio Suite, combiné au langage VBA pour implémenter l'algorithme génétique.

## CHAPITRE II

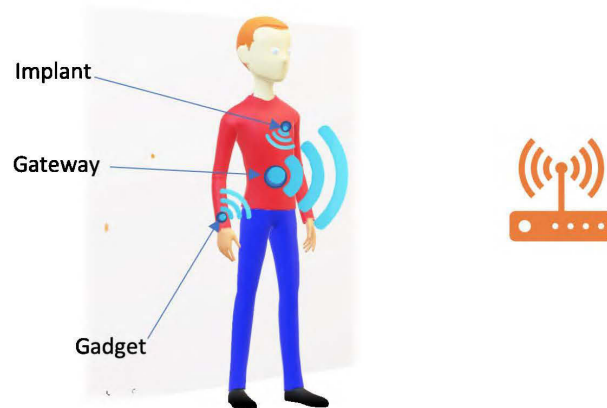
### GÉNÉRALITÉS SUR LES ANTENNES CORPORELLES

#### 2.1 Introduction

Ce chapitre est consacré pour introduire des généralités sur les antennes corporelles, les métamatériaux et l'algorithme génétique. Dans la première partie, on donne une vue d'ensemble des antennes corporelles soit des antennes implants, des antennes on-body ou bien des antennes off-body. Dans la deuxième partie, on discute les avantages d'utiliser des antennes dipôles dans le cas des antennes off-body. Dans la troisième partie, on présente les conducteurs électriques parfaits CEP et les conducteurs magnétiques parfaits CMP, ce qui permet d'introduire ensuite les conducteurs magnétiques artificiels AMC. Dans la dernière partie, on présente l'AG et le principe d'optimisation de la méthode génétique.

#### 2.2 Wireless Body Area Networks (WBAN)

Les réseaux centrés sur la personne, ou communément connus par l'acronyme WBAN, sont les réseaux sans fil de systèmes de communication utilisant les ondes électromagnétiques. Ces systèmes utilisent différentes antennes pour maintenir un chemin de communication fiable.

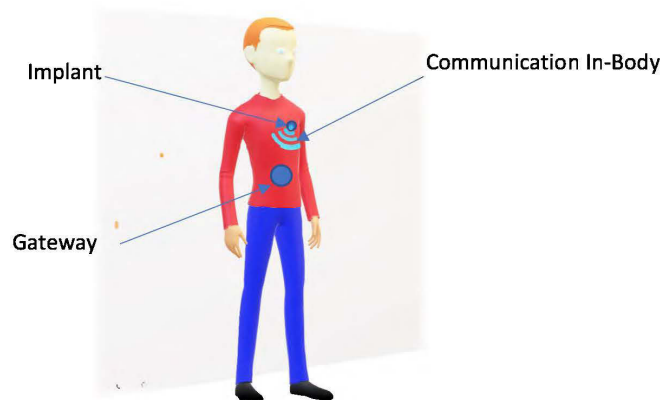


**Figure 2.1:** Exemple d'un WBAN

On distingue trois types d'antennes selon le type d'application et le mode de fonctionnement :

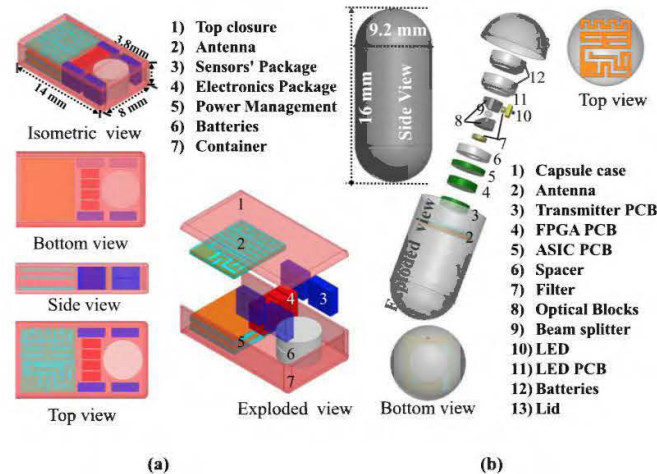
— Les antennes In-Body

Ce sont des antennes rayonnantes à l'intérieur du corps humain. Elles peuvent être soit implantées sous la peau (implants) ou prises par voie orale sous forme d'un système embarqué de capteurs condensés dans des capsules bien isolées [11].



**Figure 2.2:** Exemple de la communication In-Body

Un exemple d'antenne In-body montré dans la figure 2.3 [11].

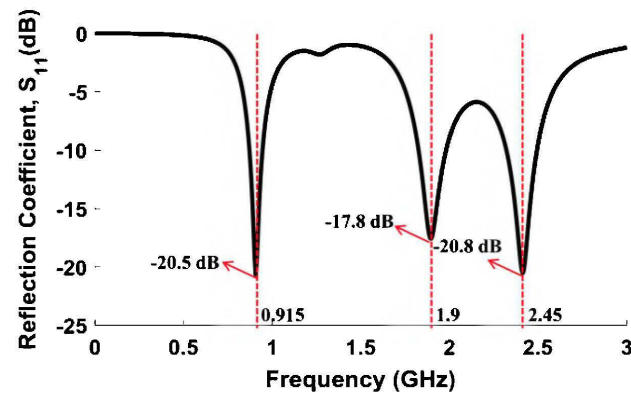


**Figure 2.3:** L'architecture des antennes In-Body. a) Implant sous la peau b) Implant sous forme de capsule pour les tissus profonds [11].

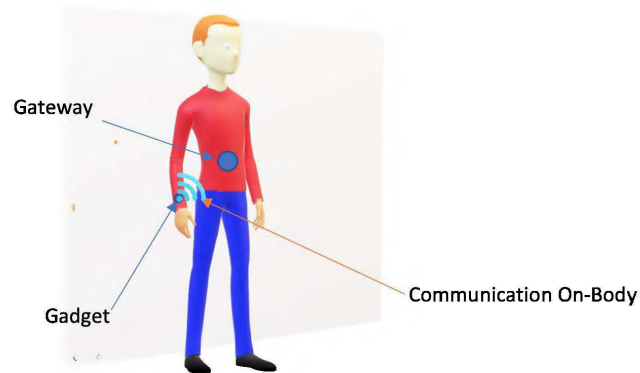
Cette antenne implantable triple bande miniaturisée est destinée à de multiples applications de biotélémétrie, fonctionnant dans les bandes industrielle, scientifique et médicale (ISM) (902–928 MHz et 2400–2483,5 MHz) et dans la bande médiane (1824–1980 MHz). Ces bandes sont conçues pour la télémétrie de données, le transfert d'énergie sans fil et l'économie d'énergie. L'antenne comprend deux dispositifs implantables, un type capsule pour l'implantation de tissu profond et un type plat pour implantation cutanée. Le volume de ces antennes est de 647 mm<sup>3</sup> et 425,6 mm<sup>3</sup>, respectivement. Le résultat de simulation de cette antenne est montré dans la figure 2.4.

#### — Les antennes On-Body

Ce type d'antennes utilise les ondes rampantes (creeping waves) pour maintenir un lien électromagnétique. Un compteur de pas, par exemple, utilise une antenne On-body pour communiquer avec une montre intelligente (smart watch) [12] comme le montre la figure 2.6.



**Figure 2.4:** Simulation du coefficient de réflexion  $S_{11}$  de l'antenne proposée par [11].

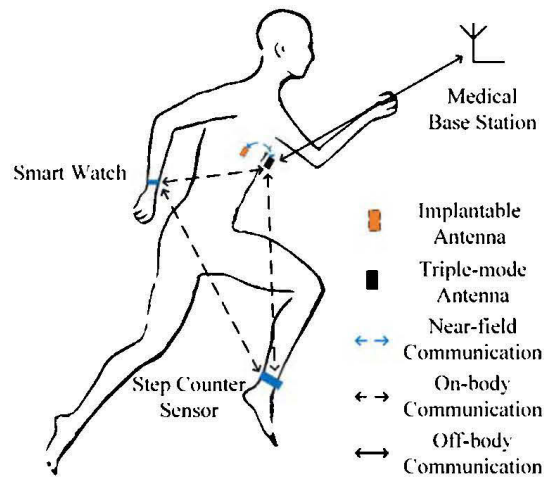


**Figure 2.5:** Exemple du système de communication On-Body

L'antenne introduite dans [12] est une antenne répéitrice portable reconfigurable (RWRA). En contrôlant l'état des diodes PIN, elle peut fonctionner en trois modes différents. Les trois modes sont On-Body, Off-Body et répéteur.

#### — Les antennes Off-Body

Les antennes Off-Body sont des antennes rayonnantes vers l'extérieur du corps humain. À titre d'exemple, un système embarqué avec un détecteur de gaz toxiques porté sur les vêtements d'un mineur qui peut communiquer cette information vers une station de base. Cette station



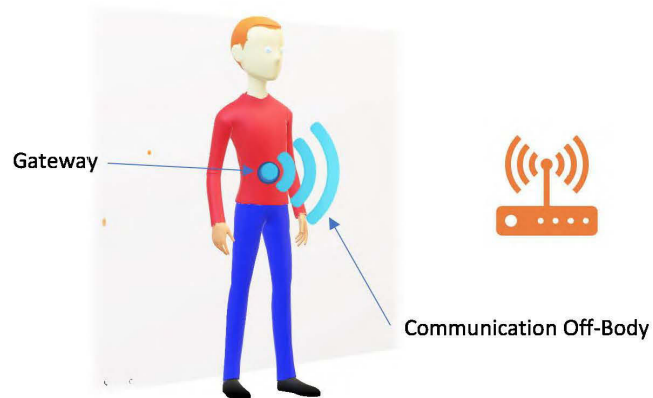
**Figure 2.6:** Illustration des différents types de communication WBAN dont une entre un compteur de pas et une montre intelligente [12].

de base étant relativement lointaine dans la mine (en surface).

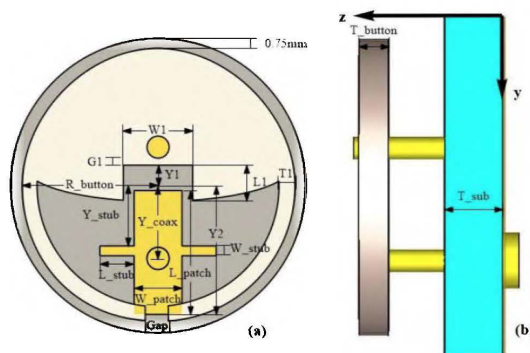
Dans le cas des antennes Off-Body, il est désirable que l'impédance d'entrée, le gain et le diagramme de rayonnement soient inchangés à proximité du corps en comparaison avec le cas dans l'espace libre. Cette propriété est satisfaite si l'antenne est isolée du corps humain en augmentant le rapport du rayonnement avant-arrière (FBR) ce qui assure une isolation découplage entre l'antenne et le corps.

Le travail présenté dans [6] introduit une nouvelle antenne bouton portable pour les applications WBAN. L'antenne est composée d'un bouton d'environ 16 mm de diamètre contenant une antenne patch au-dessus d'un disque diélectrique. Le bouton est situé au-dessus d'un substrat textile et d'un plan de masse textile conducteur incorporé dans les vêtements comme le montre la figure 2.8.

Cette antenne présente deux types de diagramme de rayonnement différents : un diagramme omnidirectionnel dans la bande 2,4 GHz pour les communications On-Body et un diagramme vers l'extérieur dans la



**Figure 2.7:** Exemple de la communication Off-Body



**Figure 2.8:** Structure de l'antenne bouton [6].

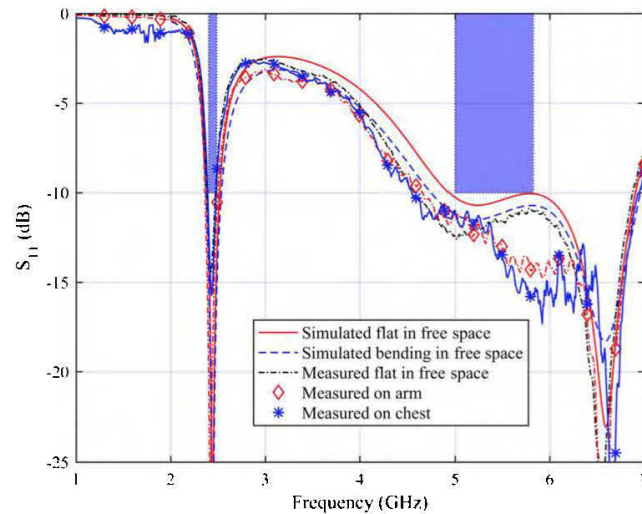
bande 5 GHz pour les communications Off-Body. En outre, l'effet de plusieurs situations réelles, telles qu'un bouton incliné et la flexion du plan de masse textile, ont été étudiées. Les résultats de simulation sont donnés dans la figure 2.9.

### 2.2.1 Applications des antennes off-body

#### 1. Santé

Des détecteurs de paramètres vitaux peuvent être installés sur le corps, où les antennes Off-Body sont utilisés pour faire communiquer ces infor-





**Figure 2.9:** Résultats de simulations et de mesures de l'antenne bouton sur le corps et dans l'espace libre [6].

mations sur l'état de santé du patient avec un système de suivi.

## 2. Localisation

Les antennes Off-Body assurant la localisation des personnes, dans le cas des catastrophes, sont primordiales pour garantir le succès de l'opération de sauvetage. Elles peuvent être aussi utile pour assurer un maximum de rendement dans les usines. En calculant le temps nécessaire pour faire les tâches et le temps de déplacement des personnes, un système de suivi peut gérer les tâches données pour un minimum de pertes de temps.

## 3. Sport

Pour remplacer les fils de mesure des différents paramètres lors des séances d'amélioration des performances ou de contrôle de rythme cardiaque.

## 4. Autres applications

D'autres utilisations comprennent les systèmes d'identification à distance, remplacement et d'autres divertissements personnels.



## 2.3 Antennes utilisées pour les communications off-body

Plusieurs antennes ont été utilisées pour les communications off-body. On cite :

- des monopoles [6] ;
- des monopoles microruban [13] ;
- des antennes F inversés [14] ;

Dans notre étude, on utilise les antennes dipôles à cause de leur géométrie permettant de minimiser l'effet de la courbure sur le corps humain, comme discuté à la fin de cette partie dans la section : Avantages d'utilisation d'une antenne dipôle.

### 2.3.1 Les antennes dipôles

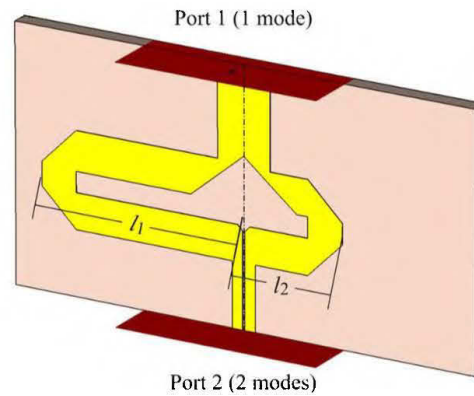
L'antenne dipôle est une antenne constituée de deux brins conducteurs dans des directions opposées [15]. Elle mesure la moitié de la longueur d'onde  $\lambda/2$  et est alimentée dans son milieu par un signal de fréquence  $f$  et de longueur d'onde  $\lambda = c/f$ . Il est à noter que la longueur de cette antenne dépend aussi de la constante diélectrique du substrat sur lequel elle est imprimée [16].

Cette antenne a un diagramme de rayonnement omnidirectionnel et un gain réalisé autour de 2.1 dBi tel que sera discuté dans le chapitre suivant.

### 2.3.2 Alimentation d'une antenne dipôle

Pour assurer une répartition optimale du courant sur l'antenne, un transformateur balun (contraction des deux mots balanced et unbalanced) est nécessaire (voir figure 2.10).

La structure de Balun a été utilisée dans [17] et [18]. Le principe de fonction-



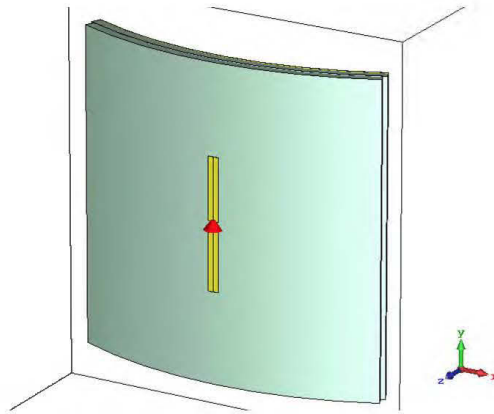
**Figure 2.10:** Alimentation d'une antenne dipôle par un balun [17].

nement de cette structure est d'introduire un déphasage de  $\pi/2$  entre les deux bornes de l'alimentation. On peut voir dans la figure 2.10 que la longueur des deux chemins de courant est différente et égale  $l_1 - l_2 = \lambda/4$ .

Cette différence de longueur se traduit par une différence de distance parcourue par le courant d'alimentation de  $\lambda/2$  donc un déphasage de  $\pi/2$  à l'entrée du dipôle.

### 2.3.3 Avantages d'utilisation d'une antenne dipôle

À cause de sa forme géométrique planaire, le substrat de l'antenne dipôle peut être courbé sans que l'antenne ne change de forme, surtout dans le cas où l'antenne est parallèle à l'axe de courbure comme le montre la figure 2.11. Cela assure une certaine stabilité dans les paramètres de l'antenne après la courbure, ce qui est une propriété désirable pour les antennes Off-Body.



**Figure 2.11:** L'effet de la courbure sur la géométrie d'une antenne dipôle.

## 2.4 Les métamatériaux

### 2.4.1 Les conducteurs parfaits

Les conducteurs électriques parfaits CEP (PEC en anglais)

Un conducteur électrique parfait n'existe pas dans la nature, car un matériau avec une résistivité nulle n'existe pas. Cependant, on peut l'assimiler à une surface métallique avec une bonne conductivité telle qu'un plan de masse en cuivre. La particularité du CEP est sa capacité à réfléchir une onde incidente avec un déphasage de  $\pi$ .

Une antenne dipôle possède généralement un diagramme de rayonnement omnidirectionnel, ce qui est une propriété à éviter pour les antennes Off-Body. Premièrement, en raison des rayonnements arrière qui sont déconseillés pour la santé et qui causent la diminution des performances de l'antenne suite à l'interaction antenne-corps. Deuxièmement, en raison du faible gain que présente cette antenne (il est reparti dans tout le tour de l'antenne). Par conséquent, on peut intégrer une surface métallique à une distance  $\lambda/4$  de l'antenne du côté du corps humain [19]. Cette surface est l'équivalent d'un CEP qui crée une

onde réfléchi en phase avec l'onde incidente, contribuant dans l'amélioration du gain total de l'antenne et protégeant ainsi le corps des méfaits de rayonnement.

Les conducteurs magnétiques parfaits CMP (PMC en anglais)

Les conducteurs magnétiques parfaits sont basés sur un concept qu'on a créé conformément au concept des CEP. Une telle surface n'existe pas dans la nature du fait que la charge magnétique n'existe pas. Un aimant possède toujours un pôle nord et un pôle sud. L'utilisation d'un CMP permet de diminuer les dimensions de l'antenne mentionnée dans le paragraphe précédent. En effet, un CMP n'introduit pas de déphasage dans l'onde réfléchi, donc on peut le placer très proche de l'antenne dipôle pour avoir le même effet d'augmentation du gain et d'isolement du corps.

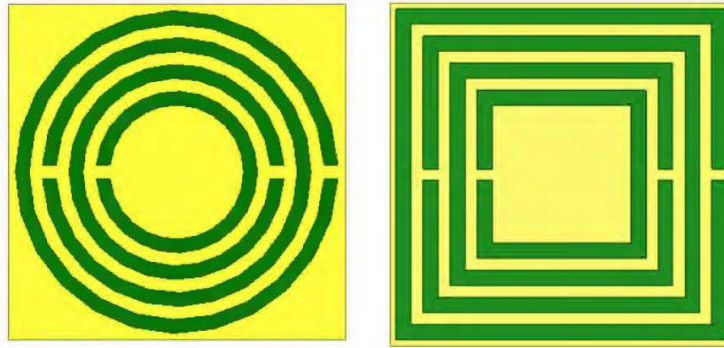
2.4.2 Les conducteurs magnétiques artificiels CMA (AMC en anglais)

Les AMC sont des structures périodiques qui imitent le fonctionnement des PMC dans une certaine fréquence. Ces types de structures sont appelés les métamatériaux.

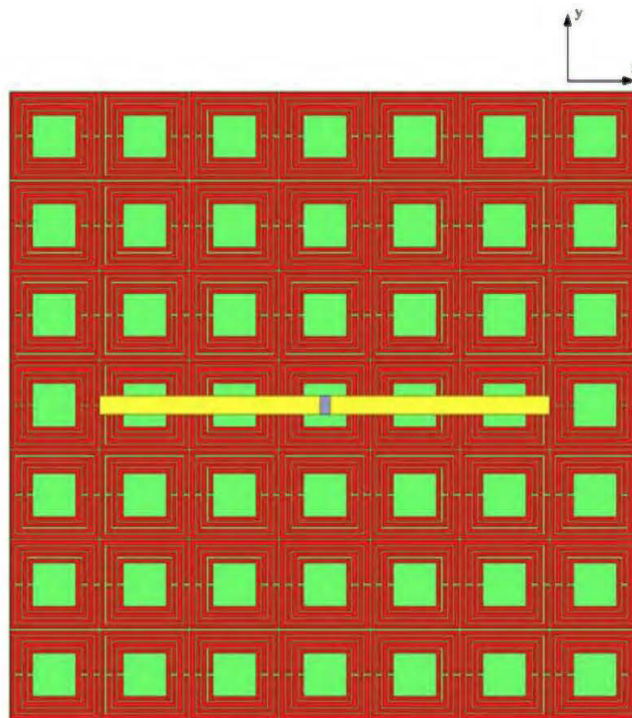
### 1. Multiple Split-Ring Resonators (MSRRs)

Les Multiple Split-Ring Resonators (MSRRs) ont été proposés dans [20] (figure 2.12). Des matrices de  $7 \times 7$  et de  $9 \times 9$  de ces structures ont été utilisées pour améliorer la directivité d'une antenne dipôle 2.13. La directivité a atteint 6 dBi pour la matrice de  $9 \times 9$  comme le montre la figure 2.14. Les résultats ont montré aussi que l'utilisation de cette structure peut remplacer le plan de masse.

Cette antenne fonctionne dans la fréquence 2.4 GHz comme le montre



**Figure 2.12:** Structure des MSRRs circulaires (à gauche) et carrées (à droite) [20].

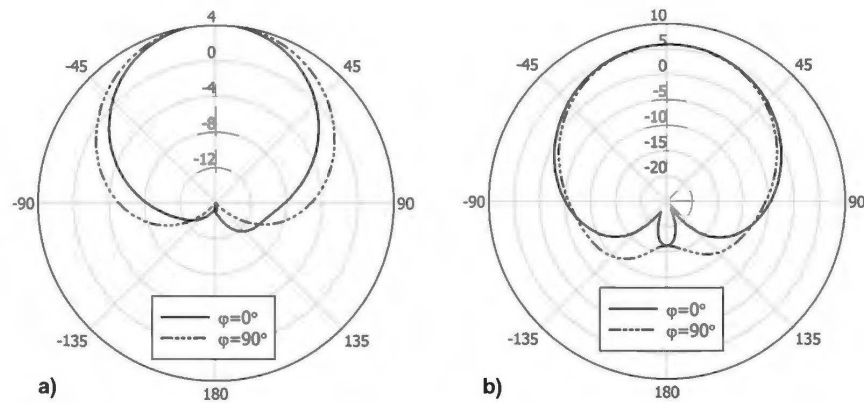


**Figure 2.13:** Antenne dipôle sur une matrice  $7 \times 7$  d'éléments MSRRs [20].

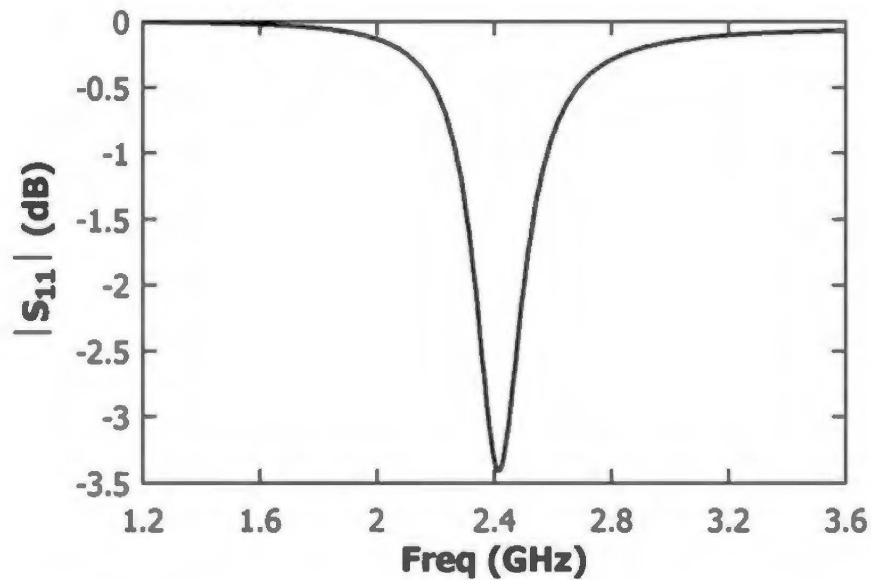
le résultat de simulation du coefficient de réflexion (voir figure 2.15)

## 2. Cellule AMC carrée

La structure présentée dans la figure 2.16 a été proposée par [21] avec une antenne ultra-large bande (figure 2.17).



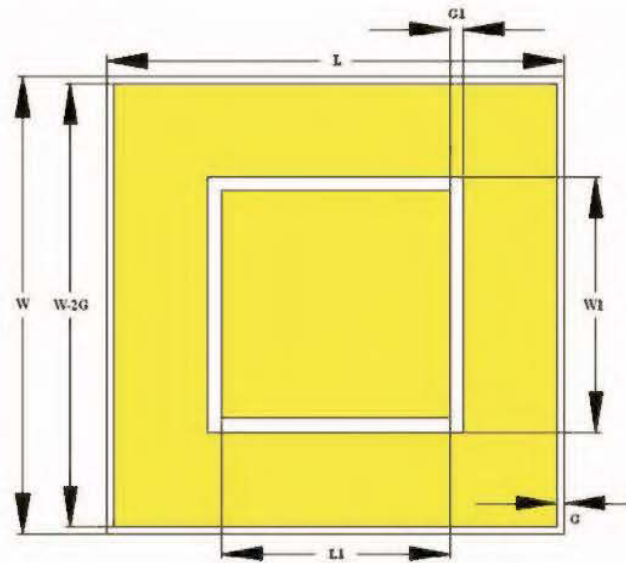
**Figure 2.14:** Résultat de simulation de la directivité de l'antenne proposée dans [20]. a) Structure à  $7 \times 7$  cellules AMC. b) Structure à  $9 \times 9$  cellules AMC.



**Figure 2.15:** Coefficient de réflexion de l'antenne proposée par [20].

Le choix d'une antenne UWB avec une structure AMC (qui est à bande étroite) peut-être contre intuitif, mais ce choix a été fait seulement pour observer la contribution qu'a apporté la structure AMC peu importe sa fréquence de fonctionnement.

Le résultat de mesure du diagramme de rayonnement de cette antenne (voir figure 2.18) montre que l'AMC a contribué à la fois dans l'améliora-



**Figure 2.16:** Structure AMC carrée utilisée dans [21].



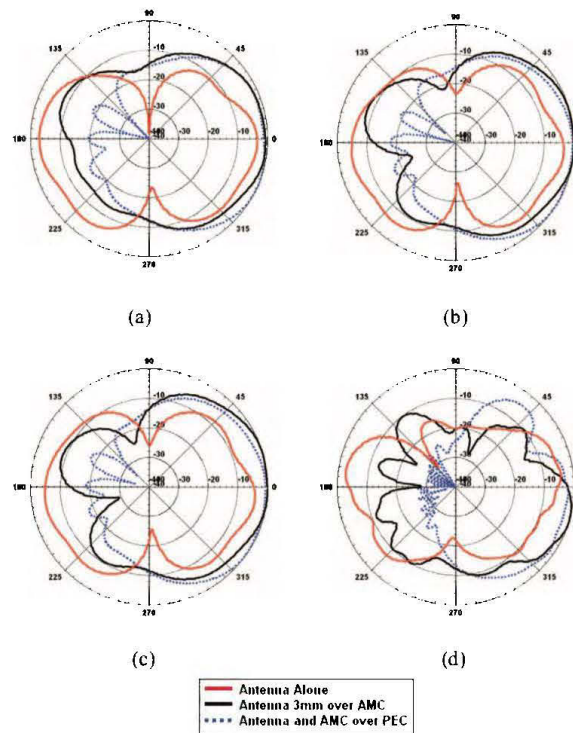
**Figure 2.17:** Réalisation de l'antenne UWB sur une matrice  $4 \times 4$  d'éléments AMC [21].

tion du gain de 7 dBi avec la diminution du FBR de 20 dB.

### 3. Cellule AMC Haltères

Ce type de structures AMC a été utilisé dans [22] et [17]. Les travaux de [22] montrent l'utilisation de cette structure dans la fréquence 75 GHz





**Figure 2.18:** Diagramme de rayonnement mesuré dans le plan E de l'antenne [21]. (a) 1.575 GHz (b) 1.710 GHz (c) 2.0 GHz (d) 5.84 GHz

(figure 2.19). La structure de l'AMC en haltère isole bien la partie arrière de l'antenne tout en améliorant le gain jusqu'à 0.72 dBi.

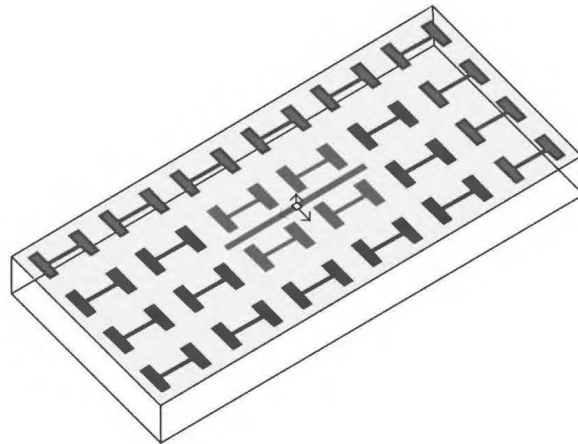
Le tableau 2.1 montre l'amélioration du gain par l'utilisation de l'AMC pour trois combinaisons du nombre des cellules AMC utilisées.

	$4 \times 6$	$4 \times 8$	$6 \times 6$
Gain (75 GHz)	0.72 dBi	-1.18 dBi	0.24 dBi

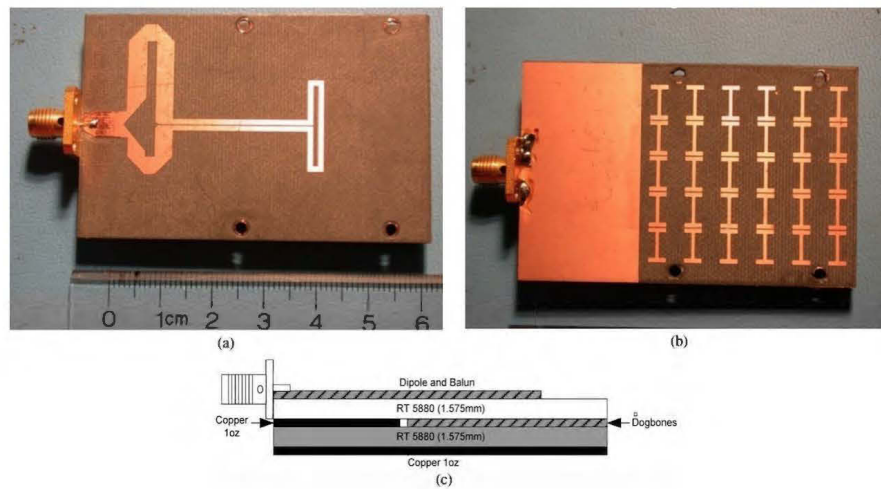
**Tableau 2.1:** Amélioration du gain en fonction du nombre des cellules AMC utilisées.

D'autre part, le même type de structure a été utilisé dans [17] comme le montre la figure 2.20. Cet élément a contribué à la réalisation d'une antenne Yagi-Uda au diagramme de rayonnement longitudinal (*endfire*) qui atteint un gain de 6 dBi.



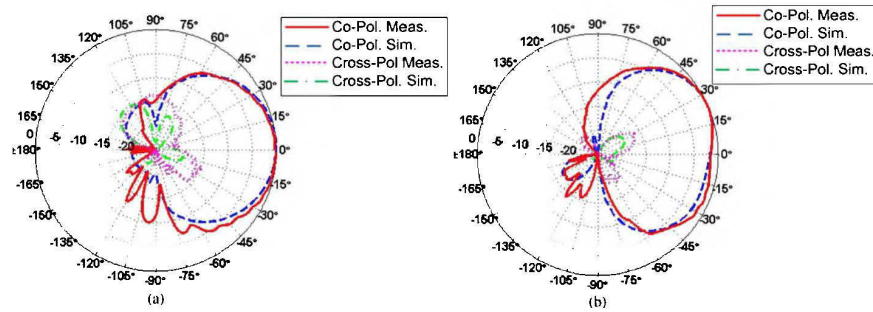


**Figure 2.19:** Structure de l'antenne dipôle sur une matrice  $4 \times 6$  d'éléments AMC sous forme d'haltères [22].



**Figure 2.20:** Structure de l'antenne dipôle sur une matrice  $5 \times 6$  d'éléments AMC sous forme d'haltères [17].

La figure 2.21 montre les diagrammes de rayonnement longitudinaux de l'antenne (endfire).



**Figure 2.21:** Résultats de mesures et de simulation de l'antenne dipôle avec une structure AMC sous forme d'haltères [17].

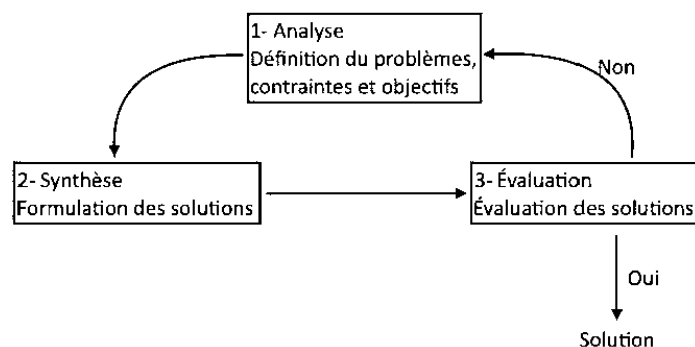
## 2.5 L'algorithme génétique (AG)

### 2.5.1 Introduction

En ingénierie, on cherche toujours à avoir les meilleures performances possibles. Pour ce faire, on établit des modèles mathématiques et on cherche la solution donnant un optimum de performances. Cependant, il n'est pas toujours possible d'établir un modèle mathématique à cause de la complexité du problème et des calculs [23]. Dans ce cas, on utilise des méthodes probabilistes [23, 24]. Des études complémentaires devraient être consacrées à l'élaboration d'un cadre probabiliste pour la conception et la caractérisation d'antennes portables [25]. La figure 2.22 représente le chemin suivi lors de l'optimisation.

### 2.5.2 L'algorithme génétique

L'algorithme génétique est considéré parmi les méthodes d'optimisation probabilistes les plus connues [26]. Cette méthode a été développée par John Holland de l'université de Michigan au début des années soixante [27]. Elle a été appliquée dans plusieurs domaines de recherche où le problème étudié est difficile à décrire avec des équations. Il a été appliqué dans plusieurs domaines de recherche où le problème étudié est difficile à décrire avec des



**Figure 2.22:** Différentes étapes de l'optimisation par l'AG.

équations.

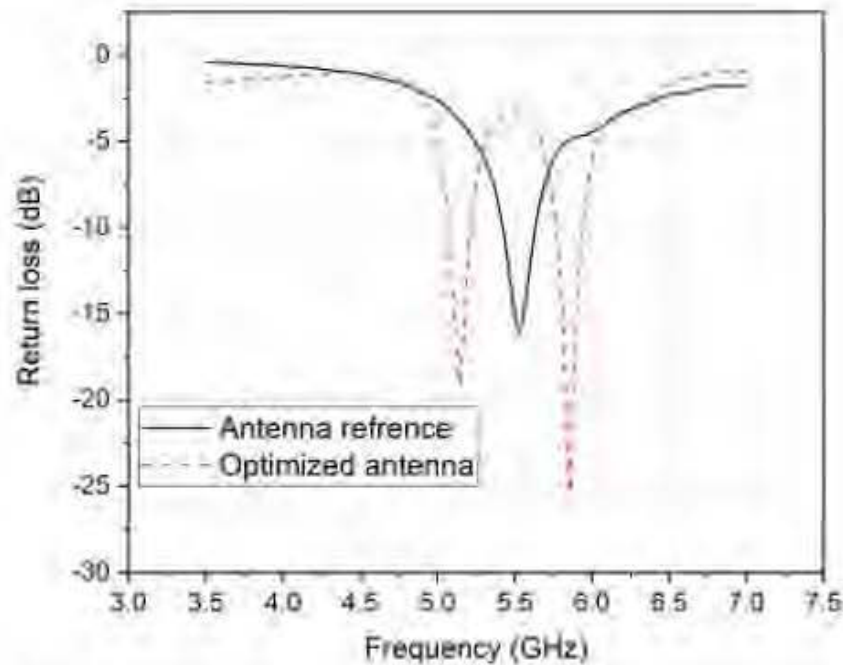
L'AG est basé sur le phénomène de sélection naturelle qu'on trouve chez les êtres vivants. Les individus adaptés aux conditions survivent, alors que ceux mal-adaptés meurent. Appliqué dans le cas des antennes, à partir d'un groupe d'antennes différentes, dit population, on évalue les performances de chacune des antennes. Les antennes avec les meilleures performances peuvent passer leurs structures (l'équivalent de l'ADN) à la génération d'antenne suivante et ceux moins adaptées ne les passent pas [28].

### 2.5.3 Etat de l'art

Les auteurs de [28] et [29] se sont concentrés sur l'utilisation du coefficient de réflexion  $S_{11}$  comme paramètre de la fonction coût.

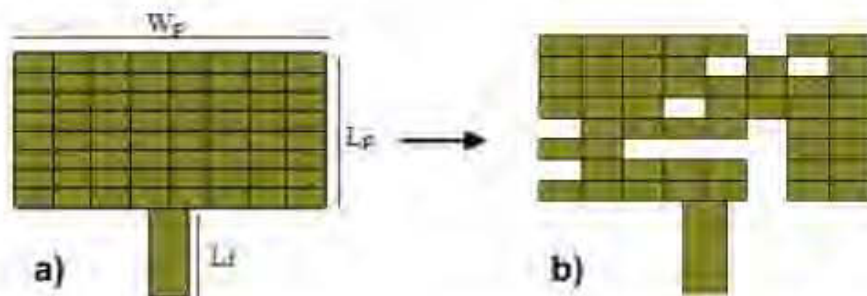
Dans [28], l'algorithme génétique (AG) a été utilisé pour optimiser le fonctionnement des antennes dans les bandes Wi-Fi de 5,2 GHz et 5,8 GHz comme le montre la figure 2.23.

L'antenne proposée avant et après l'optimisation est montrée dans la figure



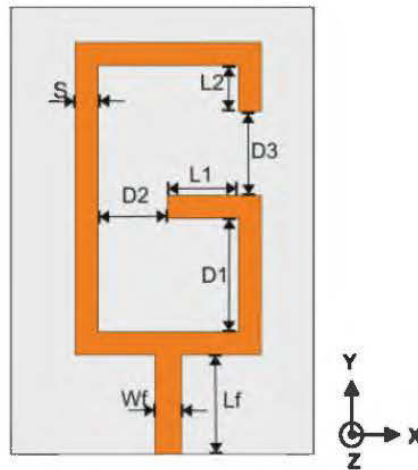
**Figure 2.23:** Coefficient de réflexion de l'antenne proposée par [28].

2.24

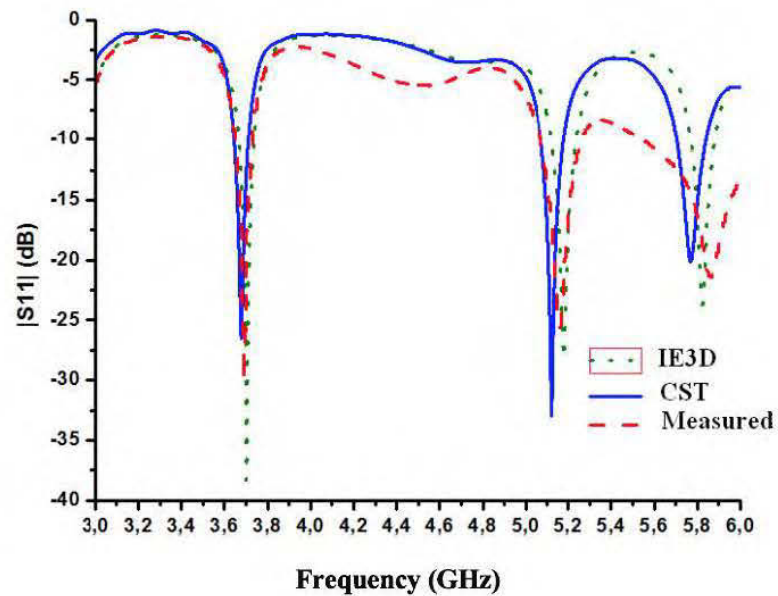


**Figure 2.24:** Antenne proposée par [28]. (a) Avant l'optimisation (b) Après l'optimisation.

Dans [29], les auteurs ont présenté la conception et le développement d'une antenne multibande sous forme G (voir figure 2.25 et 2.26), fonctionnant à la fréquence 3,7 GHz, 5,2 GHz et 5,8 GHz. De plus, afin d'augmenter son gain, un réseau de deux éléments identiques est également proposée résultant en un gain maximum de 5,2 dBi à 5,8 GHz.

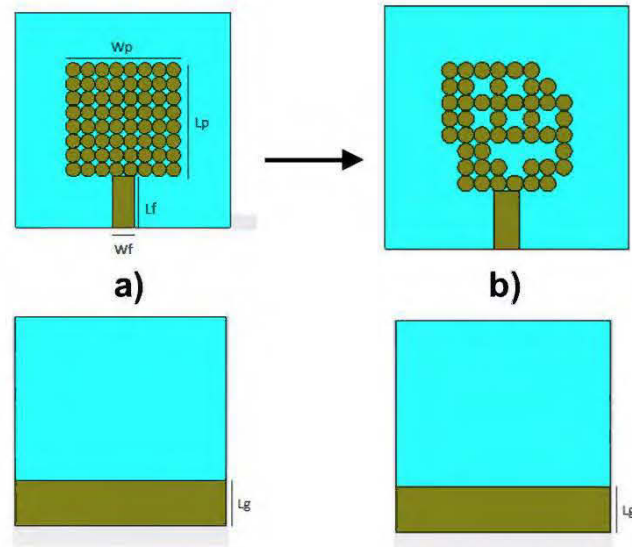


**Figure 2.25:** Antenne proposée dans [29]. (a) Avant l'optimisation (b) Après l'optimisation.



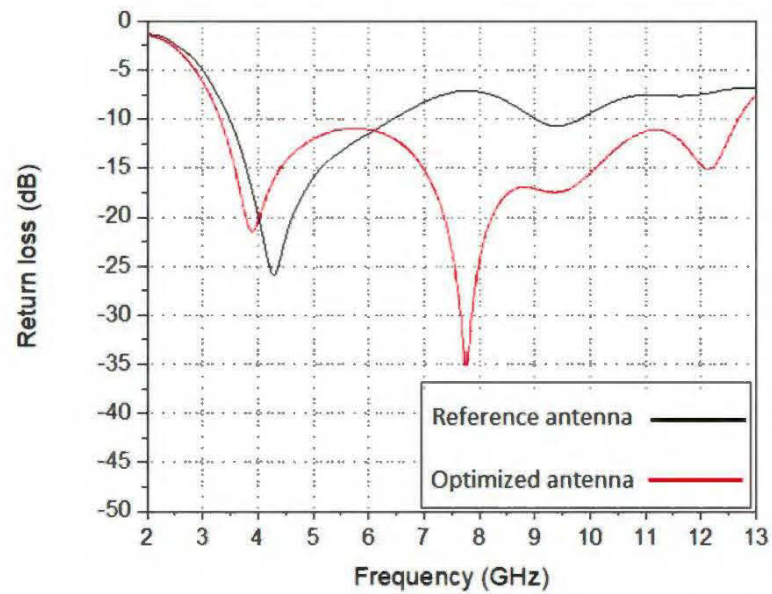
**Figure 2.26:** Coefficient de réflexion de l'antenne proposée par [29].

Une antenne UWB optimisée à pixels circulaires a été présentée dans [30]. L'algorithme génétique a été introduit pour améliorer la réponse UWB de cette antenne en enlevant des pixels circulaires de sa surface comme le montre la figure 2.27.



**Figure 2.27:** Antenne proposée par [30]. (a) Avant l'optimisation (b) Après l'optimisation.

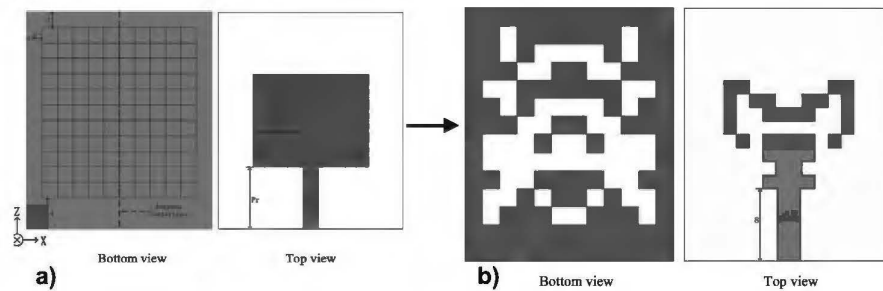
Elle couvre une large bande de fréquences allant de 3,2 GHz à 12,9 GHz (voir figure 2.28). Un bon résultat a été obtenu en termes de coefficient de réflexion, avec un bon gain dans toute la bande UWB.



**Figure 2.28:** Coefficient de réflexion de l'antenne [30].

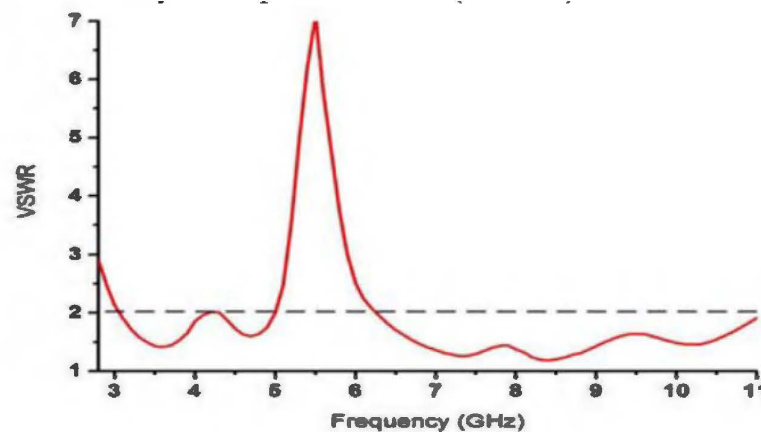


Une antenne ultra-large bande (UWB) avec un notch dans la bande de fréquence 5 GHz a été introduite dans [31]. L'algorithme génétique (GA) a été utilisé pour optimiser les structures sur le plan de masse et le patch comme le montre la figure 2.29.



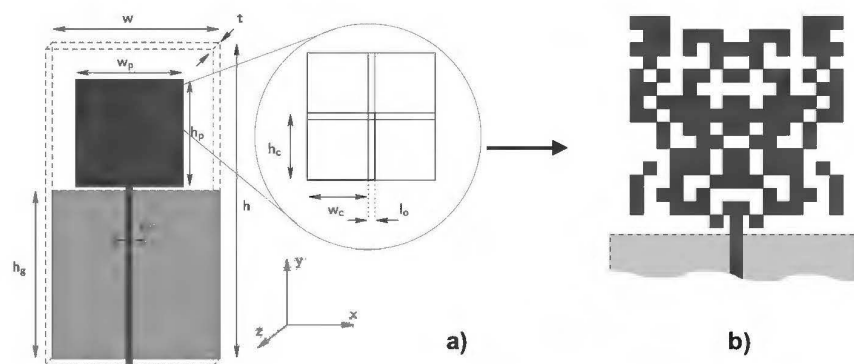
**Figure 2.29:** Antenne proposée par [31]. (a) Avant l'optimisation (b) Après l'optimisation.

Les résultats simulés ont montré que l'antenne conçue a une bande passante définie par  $VSWR < 2$ , allant de 3 à 11 GHz et une bonne performance avec une bande rejetée autour de la fréquence WLAN 5 GHz (voir figure 2.30). De plus, cette antenne présente des diagrammes de rayonnement presque omnidirectionnels et un gain stable dans la bande de fonctionnement.

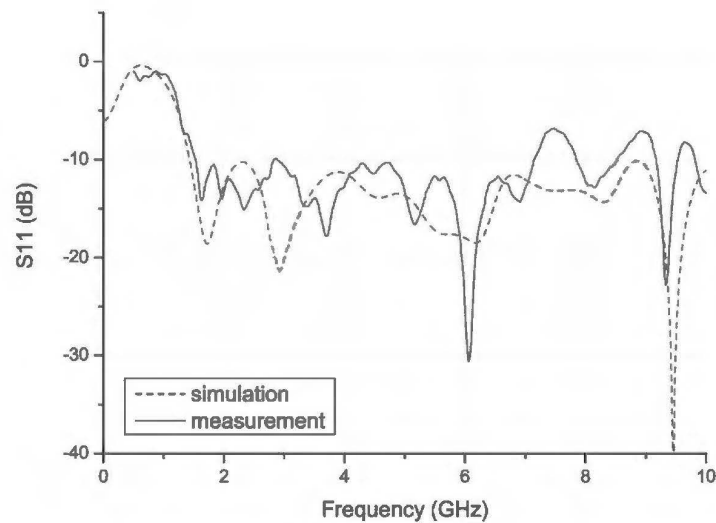


**Figure 2.30:** Coefficient de réflexion de l'antenne proposée par [31].

Une méthode de conception de monopôles planaires imprimés à large bande (UWB) utilisant l'algorithme génétique est présentée dans [32](figure 2.31 et 2.32). Cette technique utilise un chevauchement des pixels pour assurer un contact électrique entre ses derniers. Ce contact devient plus important avec les pixels qui se touchent seulement au coin. L'antenne et les chevauchement entre les pixels sont présentés dans la figure 2.31.



**Figure 2.31:** Antenne proposée par [32]. (a) Avant l'optimisation (b) Après l'optimisation.



**Figure 2.32:** Coefficient de réflexion de l'antenne [32].



#### 2.5.4 La fonction coût

La première étape de l'AG est de créer une structure et de l'évaluer, mais on aura besoin de savoir dans quel cas cette solution est proche des spécifications du cahier de charge. D'où la nécessité d'un paramètre indiquant la qualité d'une antenne quelconque. On appelle ce paramètre la fonction coût. L'appellation « fonction » vient du fait que ce paramètre est une fonction de l'antenne, et coût vient du fait que les performances ont une valeur qui peut être assimilée à un coût. Un exemple d'utilisation dans ce contexte est le suivant : On a diminué les dimensions d'une antenne mais ça nous a coûté une diminution dans le gain. Le but de l'algorithme génétique est de diminuer la fonction coût, donc, avoir la convergence vers un minimum local.

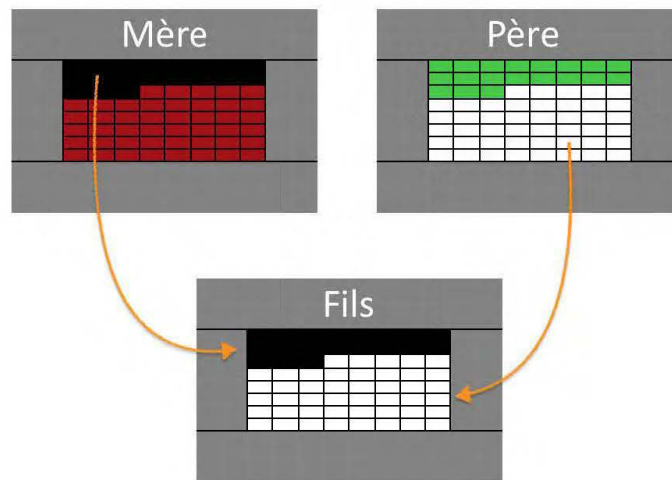
#### 2.5.5 L'opération de croisement

L'opération de croisement consiste à créer une nouvelle structure à partir de deux autres structures. L'antenne résultante est dite antenne enfant, alors que les deux antennes utilisées pour la produire sont dites antennes parentes. La figure 2.33 illustre cette opération.

L'opération de mélange est caractérisée par la proportion de contribution de chaque parent qui n'est pas forcément 50 %. On utilise une variable aléatoire pour cette proportion variante entre 30-70 % ce qui garantit la diversité des solutions (mêmes parents donnent naissance à des enfants différents).

#### 2.5.6 L'opération de mutation

Cette opération se trouve chez les êtres vivants et peut engendrer des performances désirables d'une façon accidentelle. Elle se traduit dans l'AG par une



**Figure 2.33:** Illustration de l'opération de croisement.

modification subtile dans la structure de l'antenne qui peut améliorer comme détériorer la fonction coût. Mais seulement les meilleurs changements sont pris en considération.

#### 2.5.7 Choix des paramètres de l'AG

1. **Taille de population** La taille de la population est le nombre d'antennes générées dans une génération. Suivant les recommandations rapportées dans [27], la taille de la population doit être supérieure à 20. On a choisi une taille de 40 antennes par population car elle donne plus de diversité de solutions à chaque itération en comparaison avec la valeur recommandée de 20.
2. **Nombre de générations** Le nombre de génération est choisi d'après les premiers essais. On a choisi un nombre de générations égal à 20.
3. **Probabilité de croisement** La probabilité de croisement est le taux de contribution du premier parent à la forme de l'enfant. La contribution du

deuxième parent est donc le complément à 100 %.

En général, cette probabilité est égale à 50 %, étant donné que les deux parents participent de la même proportion à la création d'enfant. Cependant, on a choisi une probabilité variable entre 30-70 % ce qui nous évite que les mêmes parents donnent naissance aux mêmes enfants.

4. **Probabilité de mutation** Lors du passage d'une génération à une autre, le code génétique d'un enfant peut avoir une ou plusieurs mutations. On traduit ceci par une probabilité de changement d'un pixel pris d'une façon aléatoire.

#### 2.5.8 Programmation VBA

L'interface graphique (GUI) de CST est un outil qui aide à la conception des antennes. On peut visualiser les formes et les modifier directement avec la souris. Cependant, cette méthode ne peut pas être utilisée pour implémenter l'algorithme génétique car elle nécessite un suivi continu de chaque antenne de chacune des générations. D'où la nécessité d'utiliser la programmation VBA offerte par CST. Cette programmation permet d'écrire les commandes sous forme de code exécutable.

1. Les possibilités
  - Automatiser des tâches répétitives.
  - Étendre les capacités de la simulation, en intégrant des tests de comparaison et la capacité d'implémenter des algorithmes compliqués.
  - Créer des exemplaires d'antennes et les modifier aisément.
2. Les limitations
  - Difficulté de programmation pour les débutants.
  - Plus adaptée aux applications complexes.

## 2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a introduit des généralités sur les antennes corporelles, les métamatériaux et l'algorithme génétique. Premièrement, on a mis l'accent sur les réseaux centrés sur le corps humain WBAN et leurs différentes applications, d'où leur nécessité. Dans une deuxième partie, on a discuté les avantages d'utiliser l'antenne dipôle dans les applications WBAN. Ensuite, on a cité deux exemples utilisés pour les antennes dipôles combinés avec des structures AMC. Ces structures ont la capacité d'isoler le corps humain et d'augmenter le gain dans la direction de propagation. Finalement, on a présenté les avantages d'utiliser les algorithmes probabilistes (ou stochastiques), plus particulièrement l'algorithme génétique. Puis, on a détaillé les différentes parties de l'algorithme génétique et son fonctionnement.

## CHAPITRE III

### CONCEPTION PAR L'UTILISATION DES MÉTAMATÉRIAUX AMC SUR LE CORPS HUMAIN

Les réseaux WBAN (Wireless Body Area Networks) sont de plus en plus utilisés dans des applications telles que la surveillance, la santé, la sécurité et les divertissements [33]. Cette omniprésence implique que plusieurs dispositifs doivent être intégrés dans le même espace limité, tout en maintenant les performances de gain. En plus, ces antennes sont destinées pour l'utilisation sur les vêtements, d'où la nécessité de protéger le corps humain des radiations électromagnétiques. En général, une plaque métallique peut être utilisée comme réflecteur pour améliorer le gain de l'antenne de 3 dB [19]. Malheureusement, l'antenne doit être placée à  $\lambda / 4$  de la plaque métallique [19]. Cela représente un inconvénient lorsque la compacité est nécessaire, en particulier lorsqu'il s'agit d'applications dans des fréquences relativement petites où  $\lambda$  est plus élevé.

Les conducteurs magnétiques artificiels (AMC) sont de plus en plus utilisés dans le domaine des antennes portables. Les AMC permettent de résoudre les deux problèmes : compacité et protection du corps humain contre les rayonnements nocifs. En résonnant de manière constructive à une certaine fréquence dans la direction du rayonnement, elles sont capables de fonctionner comme

un conducteur magnétique parfait (PMC) [17, 33]

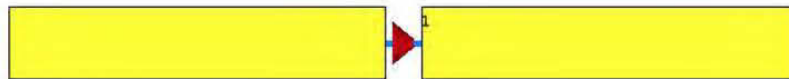
Récemment, l'élément en forme d'haltère (ou dogbone) utilisé comme élément de base de la structure AMC a été proposé dans [34]. En outre, l'utilisation du dipôle sur la surface de l'AMC a déjà été étudiée dans [17, 19]. Par contre, aucune étude n'a été rapportée sur la courbure de l'antenne avec AMC et ses effets sur le corps humain.

On propose une conception d'une antenne dipôle munie d'une surface AMC composée d'éléments en forme d'haltères pour les applications WBAN.

### 3.1 Conception de l'antenne

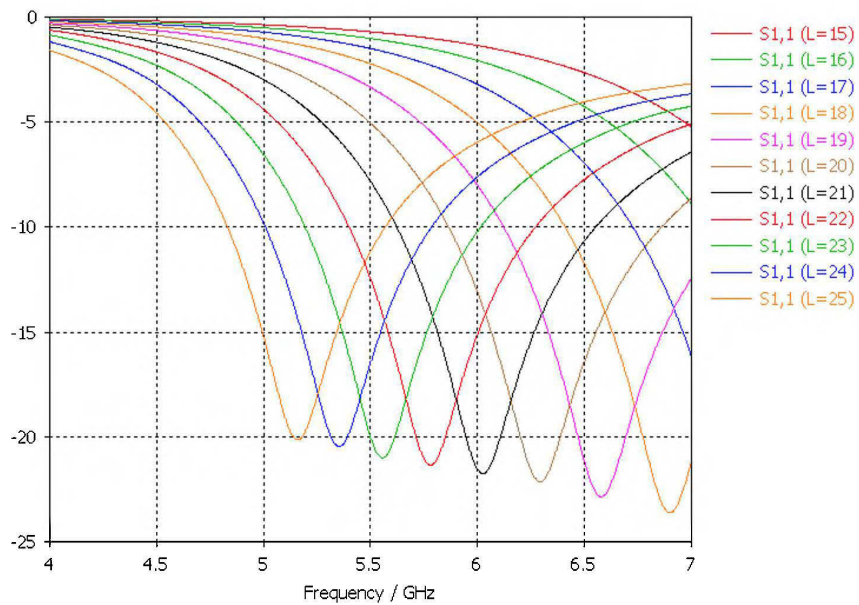
#### 3.1.1 L'antenne dipôle

L'antenne dipôle est une antenne constituée de deux brins conducteurs dans des directions opposées [15]. Elle mesure la moitié de la longueur d'onde  $\lambda/2$  et est alimentée à son milieu par un signal de fréquence  $f$  et de longueur d'onde  $\lambda = c/f$ . Il est à noter que sa longueur dépend aussi de la constante diélectrique du substrat sur lequel elle est imprimée [16]. La figure 3.1 présente une antenne dipôle alimentée par un signal de fréquence  $f$  et de longueur d'onde  $\lambda$ .



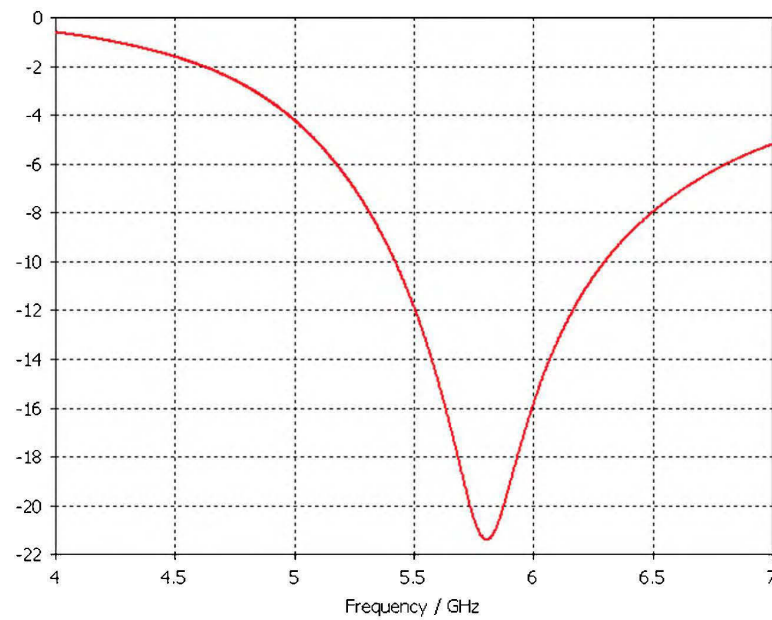
**Figure 3.1:** Structure d'un dipôle simple.

La fréquence de rayonnement de cette antenne dépend de sa longueur  $L$ . L'étude paramétrique du coefficient de réflexion  $S_{11}$  en fonction de la longueur  $L$  est montrée sur la figure 3.2.



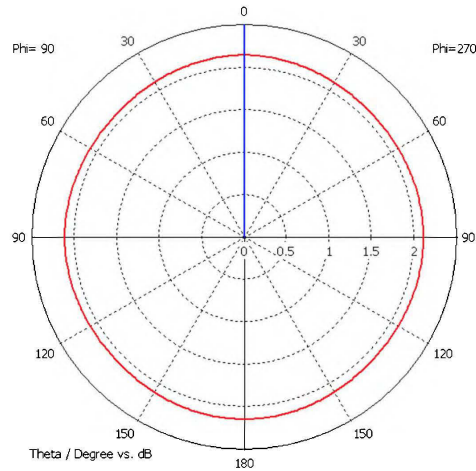
**Figure 3.2:** Coefficient de réflexion de l'antenne dipôle en fonction de sa longueur.

Le choix de  $L = 21.9$  mm fait fonctionner l'antenne dans la fréquence 5.8 GHz comme le montre la figure 3.3

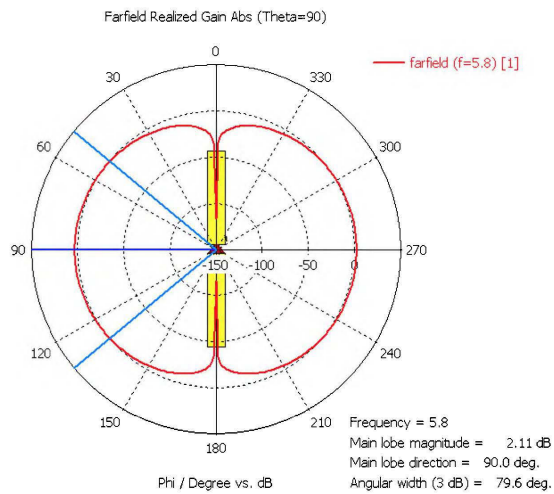


**Figure 3.3:** Coefficient de réflexion de l'antenne dipôle pour  $L = 21.9$  mm.

Cette antenne a un diagramme de rayonnement omnidirectionnel et un gain réalisé autour de 2.1 dBi. La figure 4.2 représente une simulation du diagramme de rayonnement d'une antenne dipôle et est obtenue en utilisant le logiciel de simulation CST Microwave Suite.



**Figure 3.4:** Diagramme de rayonnement d'un dipôle simple dans le plan H.



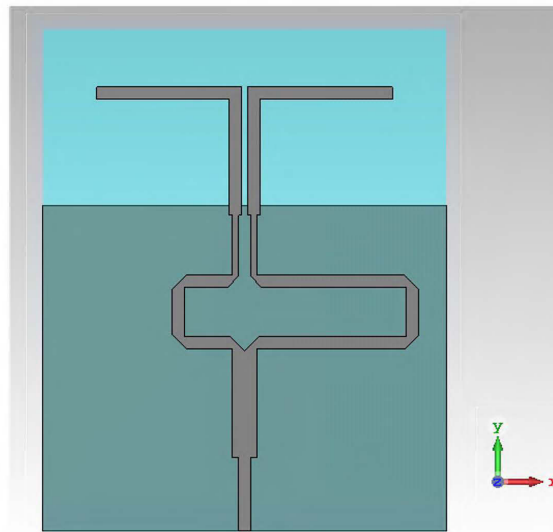
**Figure 3.5:** Diagramme de rayonnement d'un dipôle simple dans le plan E.



## 3.2 L'alimentation de l'antenne dipôle

### 3.2.1 Alimentation par Balun

L'antenne est basée sur un substrat Duroid de 0,635 mm d'épaisseur avec une constante diélectrique  $\epsilon_r = 10.2$ . Elle a une métallisation des deux côtés. La métallisation supérieure consiste en une alimentation microruban, un balun, une ligne CPS (Coplanar stripline) et deux brins formant un dipôle (voir figure 3.6).



**Figure 3.6:** Antenne dipôle alimentée par une structure balun.

Les dimensions de l'antenne sont données dans la figure 3.7. Il est à noter que ces dimensions sont choisies de telle sorte à avoir une bonne adaptation d'impédance. Chacune des largeurs de ces éléments donne la valeur de l'impédance caractéristique de cette ligne. Les longueurs sont réglées par rapport à  $\lambda_g$ , la longueur d'onde effective. On a :

- La différence de la longueur entre les deux branches est égale  $l_1 - l_2 = \lambda_g/4$ .

- Les deux branches sont alimentées par une ligne quart d'onde ( $\lambda_g/4$ ) pour les adapter à l'entrée de  $50\Omega$  et son impédance caractéristique est donnée par  $Z_0 = \sqrt{Z_{in} \times Z_l}$ .

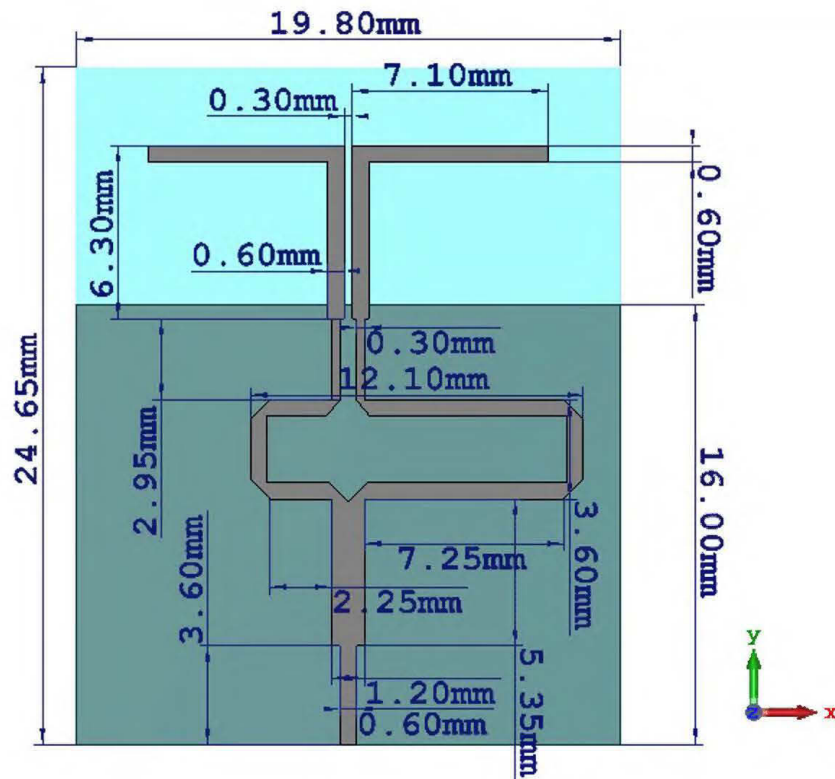
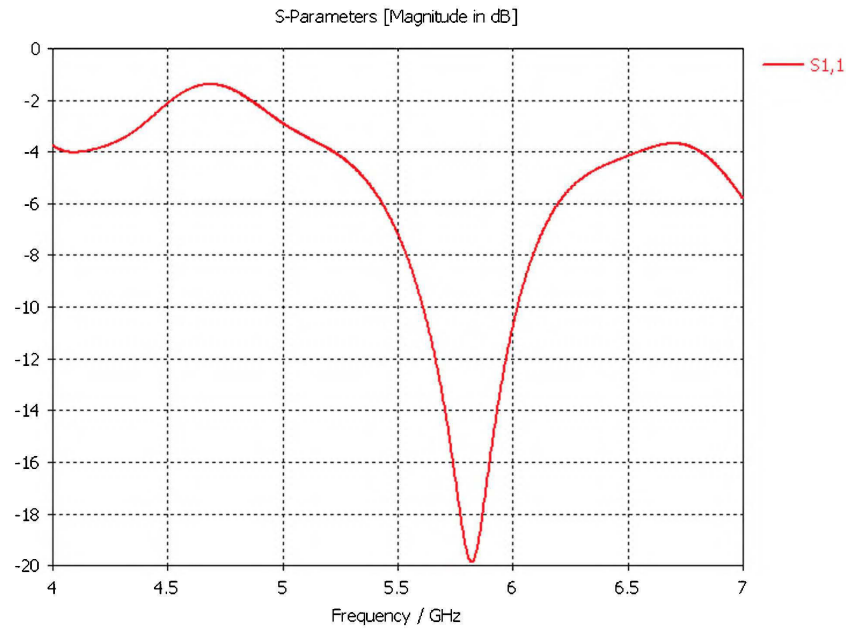


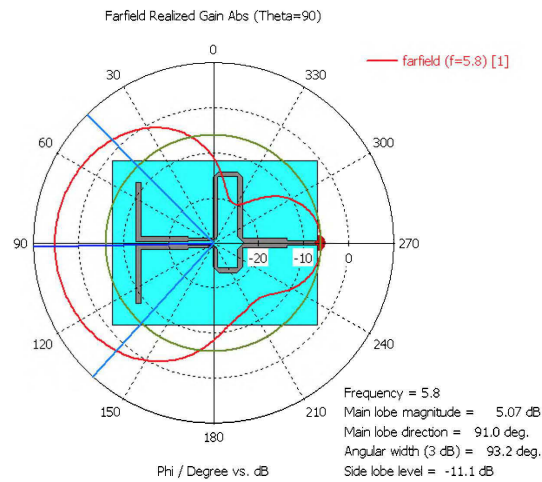
Figure 3.7: Antenne dipôle alimentée par une structure balun.

Le coefficient de réflexion (figure 3.8) de cette antenne montre sa fréquence de résonance qui est de 5.8 GHz.

Sur le plan inférieur se trouve un plan de masse tronqué, qui sert comme élément réflecteur à l'antenne. Le plan de masse tronqué est utilisé comme élément réflecteur vu qu'il est situé à une distance  $\lambda_g/4$  de l'élément rayonnant. L'emplacement de cet élément réflecteur par rapport au dipôle cause un diagramme de rayonnement longitudinal (endfire) (voir figure 3.9 et figure 3.10)



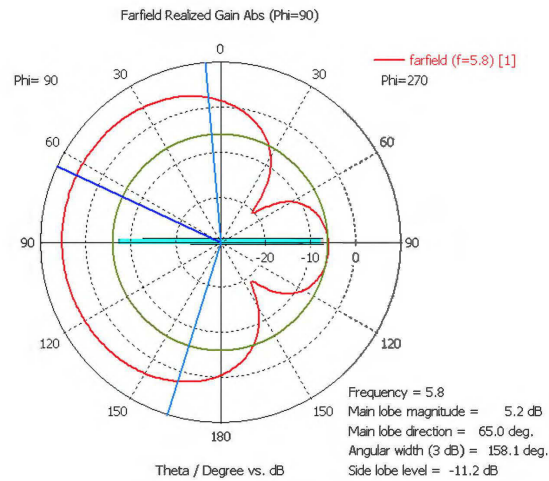
**Figure 3.8:** Coefficient de réflexion de l'antenne dipôle proposée.



**Figure 3.9:** Diagramme de rayonnement simulé de l'antenne alimentée par un Balun dans le plan E.

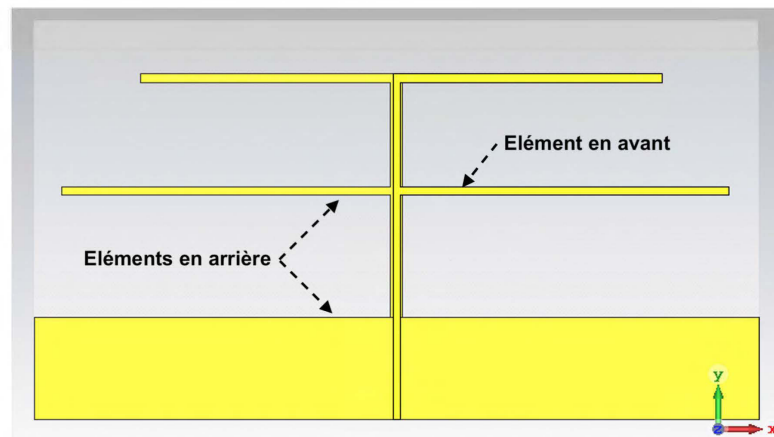
### 3.2.2 Alimentation par une ligne microstrip :

L'antenne dans la figure 3.11 est inspirée du travail de [35]. Elle consiste en deux couples de brins métalliques dans des directions opposées des deux cô-



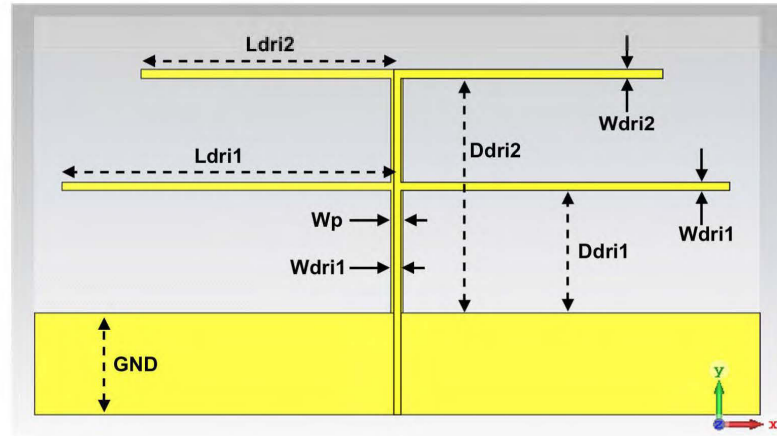
**Figure 3.10:** Diagramme de rayonnement simulé de l'antenne alimentée par un Balun dans le plan H.

tés d'un substrat Roger RO 4350 d'épaisseur 0.254 mm. L'antenne comporte aussi un plan de masse tronqué fonctionnant comme élément réflecteur. Les dimensions données dans le tableau 3.1 sont prises de [35] afin d'assurer une bonne adaptation.



**Figure 3.11:** L'antenne référence.

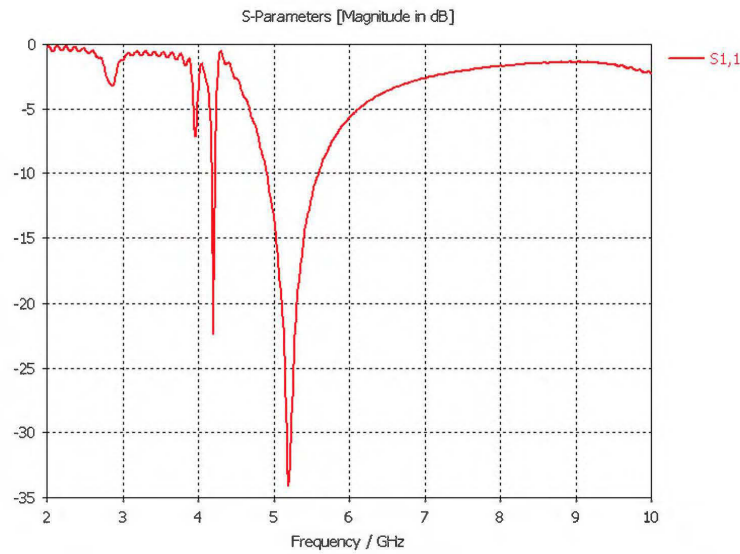
On a utilisé l'outil d'optimisation offert par CST Studio Suite pour optimiser la longueur de l'élément rayonnant en haut (driver 2) pour fonctionner dans la fréquence 5.2 GHz. La méthode utilisée est « Trust Region Framework » avec



**Figure 3.12:** Dimensions de l'antenne.

Paramètre	$W_{dri1}$	$W_{dri2}$	$D_{dri1}$	$D_{dri2}$	$W_p$	$GND$
Valeur (mm)	0.35	0.40	5.32	10.25	0.50	4.48

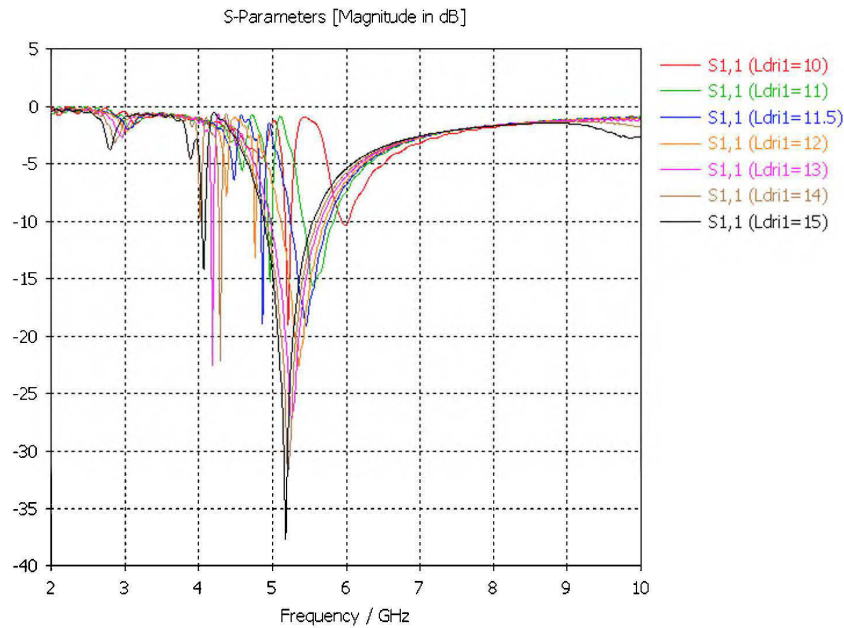
**Tableau 3.1:** Tableau résumant les paramètres inspirés de [35].



**Figure 3.13:** Coefficient de réflexion de l'antenne optimisée.

$\sigma = 0.2$ . Cette méthode a convergé dans 7 itérations. La valeur trouvée est de  $L_{dri2} = 11.45mm$ . Cette antenne résonne dans la fréquence 5.2 GHz comme le montre le résultat du coefficient de réflexion simulé (figure 3.13).

Une étude paramétrique (10-15 mm) a été menée sur le deuxième élément (driver 1). Le résultat du coefficient de réflexion (figure 3.14) montre que sa longueur  $L_{dri1}$  n'affecte pas la fréquence de fonctionnement. Par contre, elle contribue à une augmentation du gain autour de la fréquence 5.2 GHz (voir figure 3.15).



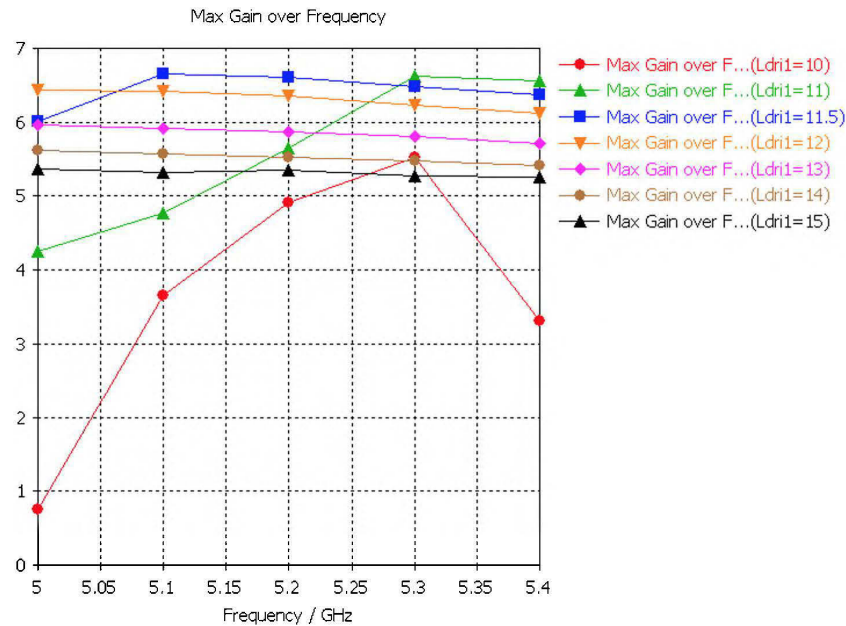
**Figure 3.14:** Coefficient de réflexion de l'antenne en fonction de  $L_{dri1}$ .

On remarque que la meilleure valeur trouvée est de 11.5 mm, mais cette valeur a introduit un léger décalage fréquentiel, par conséquent, un mauvais coefficient de réflexion. Donc, on prend la valeur 12 mm qui représente un bon compromis entre le gain et les pertes de retour. Résultant ainsi en un gain réalisé de 6.5 dBi.

### 3.3 Antenne dipôle avec structure AMC

L'antenne utilisée dans cette étude est basée sur la surface AMC rapportée dans [17]. Elle a été optimisée pour travailler à la fréquence 5,2 GHz. L'utilisa-





**Figure 3.15:** Gain réalisé maximum de l'antenne en fonction de Ldri1.

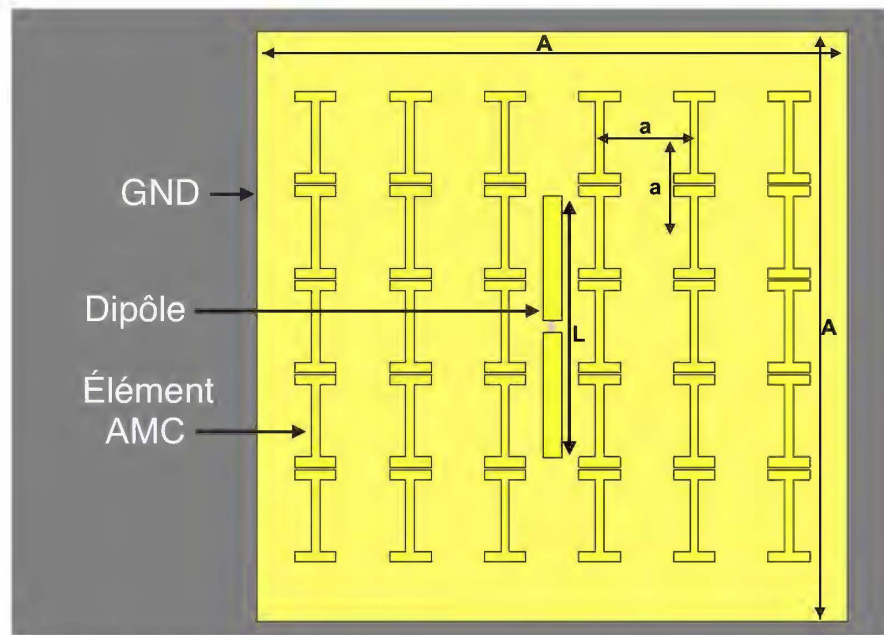
tion d'une surface AMC offre une bonne isolation et protection du corps humain [34].

L'AMC consiste en une matrice  $A \times A$  mm de  $6 \times 5$  cellules en forme d'haltères. Chaque cellule est séparée des cellules adjacentes par une distance  $a$ , comme le montre la figure 3.16.

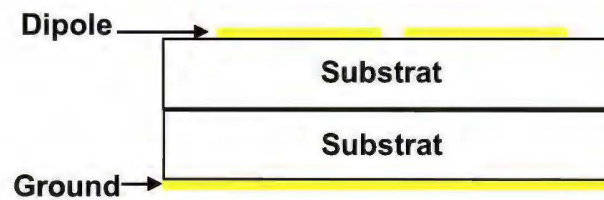
### 3.3.1 L'antenne référence

L'antenne référence consiste en un dipôle placé au-dessus d'un plan de masse. Deux substrats Rogers RT 5880 d'une épaisseur de 1,575 mm séparent le dipôle du plan de masse (figure 3.17). L'utilisation de deux substrats est primordiale, car on va insérer les cellules AMC entre ces deux derniers lors de l'étape suivante.

L'utilisation de cette configuration permet de simuler l'antenne dipôle en te-



**Figure 3.16:** Structure de l'antenne référence montée sur la surface AMC.

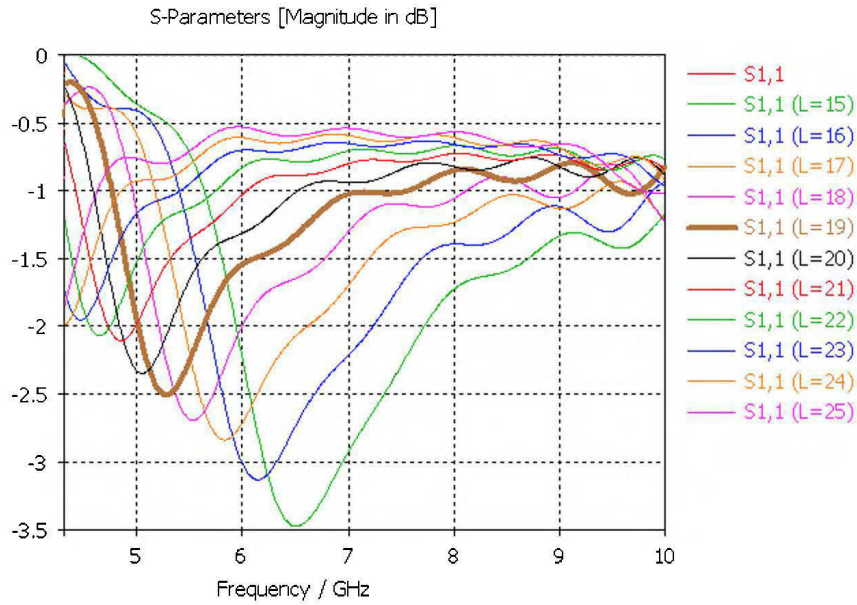


**Figure 3.17:** Vue de profil de la structure de l'antenne de référence.

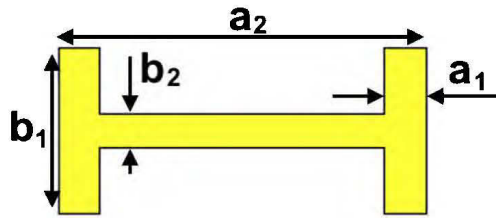
nant en compte la constante diélectrique effective  $\epsilon_{eff}$ . Le résultat de simulation du coefficient de réflexion (figure 3.18) montre qu'il faut prendre  $L = 19$  pour que l'antenne fonctionne dans la fréquence 5.2 GHz. En tenant cette valeur en compte, la deuxième étape est d'insérer les cellules AMC (figure 3.19).

L'antenne référence consiste en un dipôle placé au-dessus de la structure AMC. Un substrat Rogers RT 5880 d'une épaisseur de 1,575 mm sépare le dipôle de l'AMC, comme le montre la figure 3.20. Le même substrat est utilisé entre l'AMC et le plan de masse. On utilise la longueur optimisée du dipôle  $L = 19\text{mm}$ .





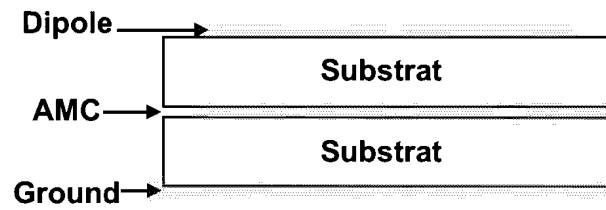
**Figure 3.18:** Coefficient de réflexion de l'antenne référence en fonction de  $L$ .



**Figure 3.19:** Structure d'un élément de l'AMC.

On a utilisé comme valeurs préliminaires des cellules AMC celles proposées par [17], voir tableau 3.2.

Ces paramètres, étant pas encore optimaux pour fonctionner dans la fréquence 5.2 GHz, doivent être réglés. Après avoir modifier ces paramètres un par un, on a constaté que les valeurs  $a_1$ ,  $b_1$  et  $b_2$  ont peu d'influence sur la fréquence de résonance de l'antenne et sont plus utilisés pour l'adaptation d'impédance. Par contre, la valeur  $a_2$  a une influence directe sur la fréquence de fonctionnement. Un étude paramétrique a donné  $a_2 = 7.73mm$ .



**Figure 3.20:** Vue de profil de la structure de l'antenne référence montée sur la surface AMC.

Paramètre	$a_1$	$a_2$	$b_1$	$b_2$
Valeur (mm)	0.875	7.83	3.5	0.7

**Tableau 3.2:** Tableau résumant les valeurs des paramètres de la cellule AMC proposés par [17].

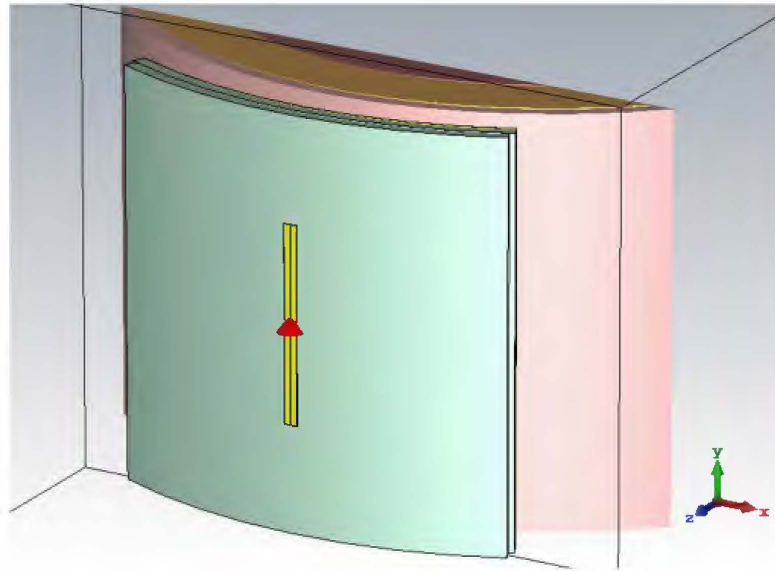
Les paramètres des éléments sont donnés dans la première ligne du tableau 3.3 et les paramètres de l'antenne sont donnés dans la deuxième ligne du même tableau.

Paramètre	$a$	$A$	$a_1$	$a_2$	$b_1$	$b_2$
Valeur (mm)	7.9	50	0.875	7.73	3.5	1.7

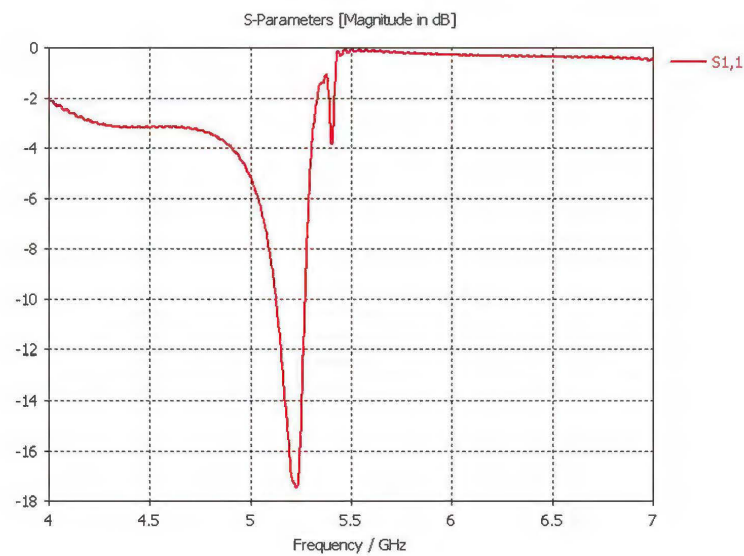
Paramètre	$M_t$	$s$	$W$	$h$
Valeur (mm)	0.035	1	1.65	1.575

**Tableau 3.3:** Tableau résumant les valeurs des paramètres de l'antenne avec AMC.

Après avoir plié l'antenne sur le modèle du bras humain de rayon 51 mm (figure 3.21), on a remarqué un décalage fréquentiel. Pour conserver la même fréquence de résonance de 5,2 GHz, l'optimisation de la longueur du dipôle a donné  $L = 24$  mm. La simulation du coefficient de réflexion pour cette longueur montre une bonne adaptation d'impédance (figure 3.22).



**Figure 3.21:** Antenne dipôle courbée sur le modèle du bras humain.

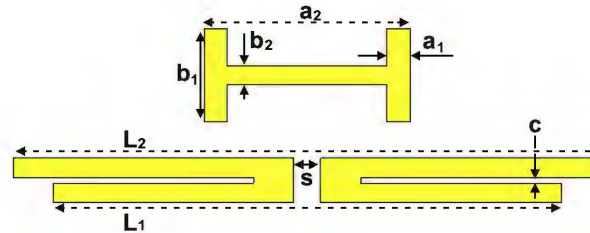


**Figure 3.22:** Coefficient de réflexion de l'antenne dipôle courbée sur le modèle du bras humain.

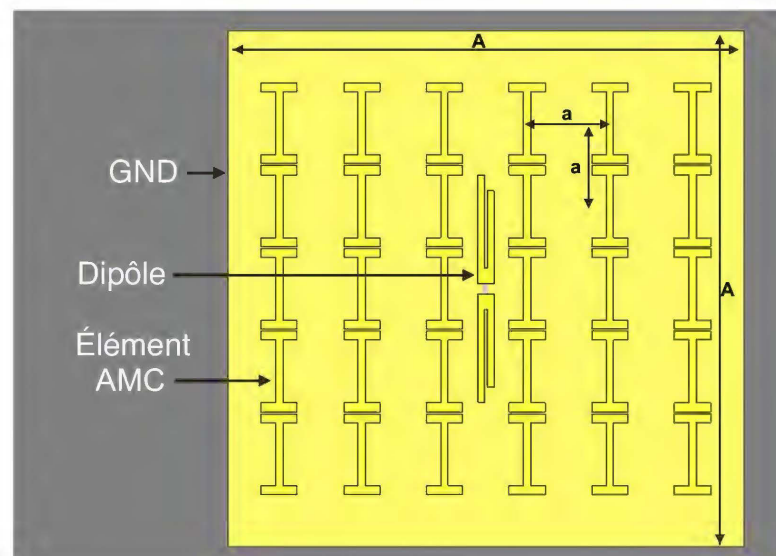
### 3.3.2 Conception de l'antenne

Afin de satisfaire la condition de la stabilité des performances de l'antenne en terme de bande de fréquence, un compromis entre les deux longueurs  $L_1 =$

19 mm et  $L_2 = 24$  mm doit être assuré. Pour cela, on a proposé une nouvelle structure repliée pour le dipôle (figure 3.23). Elle consiste en un dipôle double dont les longueurs sont  $L_1 = 19$  mm et  $L_2 = 23$  mm. La figure 3.24 montre la structure finale de l'antenne.



**Figure 3.23:** Conception des éléments de l'antenne. (a)- Structure optimisée de l'élément de l'AMC et du dipôle. (b)-Structure de l'antenne double dipôle montée sur la surface AMC.



**Figure 3.24:** Structure de l'antenne repliée montée sur la surface AMC.

### 3.4 Essais sur le corps humain

Afin de tester l'antenne sur le corps humain, on choisit la région du corps qui présente un maximum de courbure de l'antenne. Parmi les différentes possibilités, le bras présente un maximum de courbure à cause de son petit rayon. Un

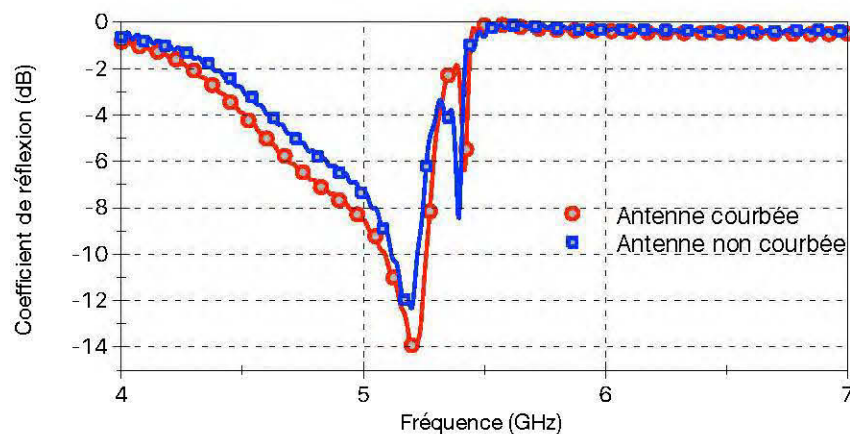
modèle du bras humain a été construit pour effectuer la simulation.

#### 3.4.1 Modèle du bras humain

Les paramètres des différents tissus du bras (peau, muscle et graisse) sont prédéfinis dans la bibliothèque de la famille Voxel de CST Studio Suite. Le modèle construit consiste en un cylindre plein de rayon 51 mm, le rayon moyen du bras de l'homme. Le bras consiste en une couche de 2 mm de peau, 8 mm de graisse et 29 mm de muscle [36]. L'os n'est pas inclus dans la simulation car il n'affecte pas les résultats à cause de sa profondeur et ne fait qu'augmenter la complexité des calculs, donc le temps de simulation.

#### 3.5 Résultats de simulation

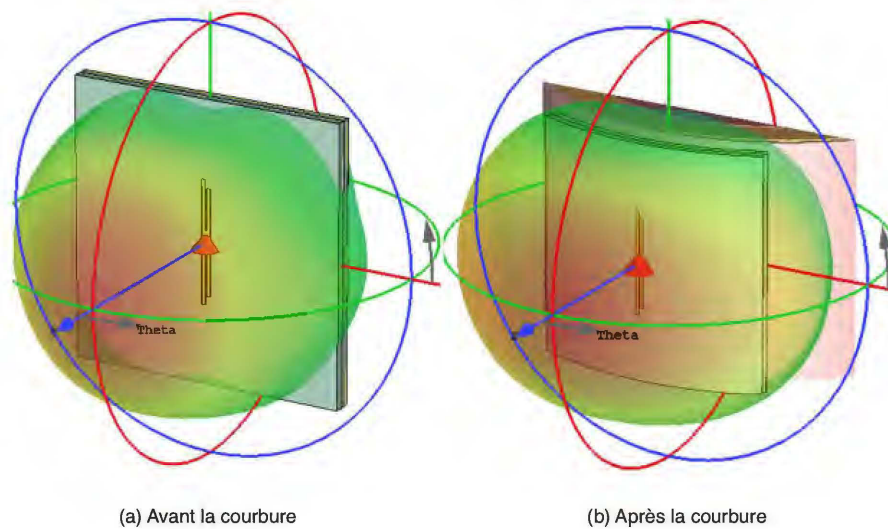
Toutes les antennes dans ce travail ont été simulées sur le logiciel CST Studio Suite. Le coefficient de réflexion de l'antenne avant et après la courbure est illustré dans la figure 3.25. Une légère différence du  $S_{11}$  de l'antenne après la courbure est observée mais pas de décalage fréquentiel.



**Figure 3.25:** Résultats simulés du coefficient de réflexion avant et après la courbure.

### 3.5.1 Gain

Le gain de l'antenne planaire est de 7,43 dBi. On observe une diminution du gain à 6,24 dBi après la courbure de l'antenne sur le modèle du bras humain. D'autre part, l'angle à 3 dB a été augmenté lors de la courbure. La figure 3.26 présente une comparaison des diagrammes de rayonnement de l'antenne dans l'espace libre et sur le bras humain.



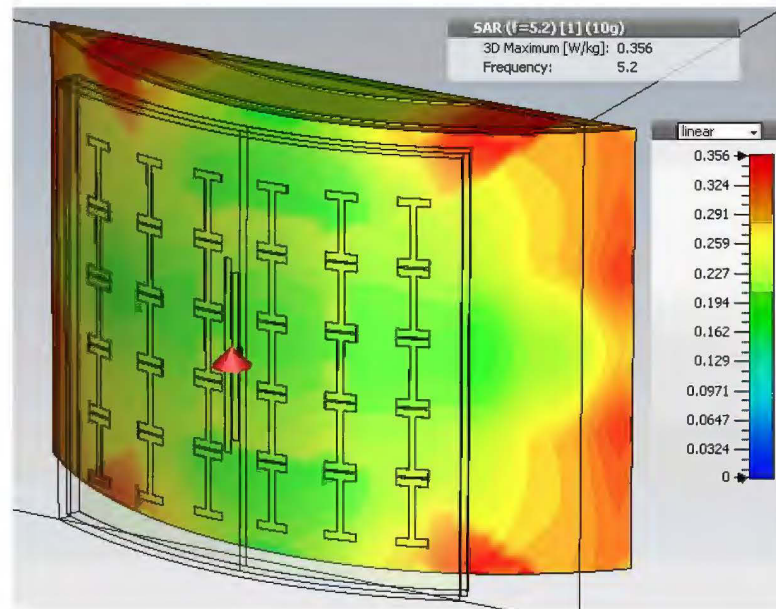
**Figure 3.26:** Résultat de simulation du gain réalisé avant et après la courbure.

### 3.5.2 Débit d'absorption spécifique (SAR)

Le SAR est la mesure du ratio entre la puissance émise d'une antenne en watts et la masse exposée de tissu humain en Kg. La valeur maximale du SAR permmissible est de 1,6 W/Kg [37]. D'après les simulations sur le gain, on a montré que les diagrammes de rayonnement sont presque identiques, ce qui signifie qu'une bonne isolation entre le corps et l'antenne est obtenue. Pour confirmer, l'effet sur le corps humain en termes de SAR est également simulé et les résultats sont illustrés sur la figure 3.27. On remarque que le niveau de



SAR égale à  $0.356 \text{ W / kg}$  est bien inférieur au niveau maximal conseillé de  $1,6 \text{ W / kg}$  [37].



**Figure 3.27:** Résultat de la simulation du SAR sur un modèle de bras humain de rayon 51 mm.

### 3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a appliqué deux méthodes d'alimentation des antennes dipôles. Ensuite, on a présenté les étapes prises lors de la conception d'une antenne dipôle avec une surface AMC. Cette antenne présente un diagramme de rayonnement directif avec un gain réalisé de plus de 6 dBi. L'utilisation de la surface AMC en combinaison avec le plan de masse isole bien le corps humain. D'où, le niveau SAR très faible, ce qui est conforme avec la norme précisant le niveau SAR maximum permis de  $1,6 \text{ W/Kg}$ . Les paramètres de cette antenne sont stables après flexion sur le bras humain. Ainsi, cette antenne peut être utilisée dans les réseaux de communication sans fil.

## CHAPITRE IV

### OPTIMISATION DE L'ANTENNE YAGI-UDA PAR L'ALGORITHME GÉNÉTIQUE

#### 4.1 Introduction

Présentement, on trouve les systèmes de communication sans fil dans presque tous les domaines. Ces systèmes utilisent des antennes pour maintenir un lien de communication. Cependant, de nombreux types d'antennes ont été développés, chacune avec des propriétés différentes. Certains de ces types sont encore utilisés alors que d'autres ont cessés d'exister sur le marché.

L'antenne Yagi-Uda est l'une des antennes les plus connues pour le grand public. Cela est principalement dû à son utilisation répandue dans les récepteurs de télévision de l'époque. Aujourd'hui, même si elles sont moins utilisées dans les systèmes de communication sans fil, plusieurs études théoriques et expérimentales exhaustives ont eu lieu [38]. Ce qui veut dire que presque tous les aspects de l'antenne Yagi-Uda ont été explorés. Par conséquent, il est difficile d'améliorer les performances des antennes Yagi-Uda existantes. Le principal objectif de cette étude est d'améliorer le gain d'une antenne Yagi-Uda déjà optimisée.

L'algorithme génétique (AG) a été utilisé pour optimiser le fonctionnement des



antennes dans les bandes Wi-Fi de 5,2 GHz et 5,8 GHz [28]. Les travaux rapportés dans [28-29] se sont concentrés sur l'utilisation du coefficient de réflexion  $S_{11}$  comme paramètre de la fonction coût. De même, les études rapportées dans [30], [31] et [32] ont utilisé l'AG pour optimiser les antennes patch UWB. Enfin, [39] a appliqué l'AG pour optimiser le gain d'une surface EBG. Cette partie porte sur l'application de l'AG au directeur d'une antenne Yagi-Uda afin d'obtenir un gain plus élevé que les méthodes classiques qui ont atteint leurs limites.

Dans cette partie, on commence par un simple dipôle et on y rajoute un réflecteur et un directeur, ce qui donne une antenne Yagi-Uda. Deuxièmement, on fait l'optimisation de dimensions de cette antenne pour avoir un gain élevé et un coefficient de réflexion acceptable. Ensuite, on choisit une subdivision et on applique l'algorithme génétique sur cette subdivision. Finalement, on évalue les performances de la solution trouvée et on donne une conclusion.

## 4.2 Méthodologie suivie

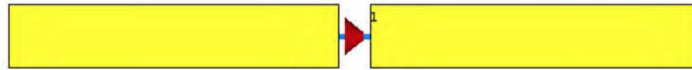
La méthode d'optimisation suivie dans cette partie est la méthode génétique. Les paramètres de la fonction coût de cette optimisation sont d'augmenter le gain tout en conservant l'adaptation en fréquence de l'antenne.

### 4.2.1 Optimisation de l'antenne référence

On commence par l'optimisation de l'antenne Yagi-Uda :

#### Antenne dipôle

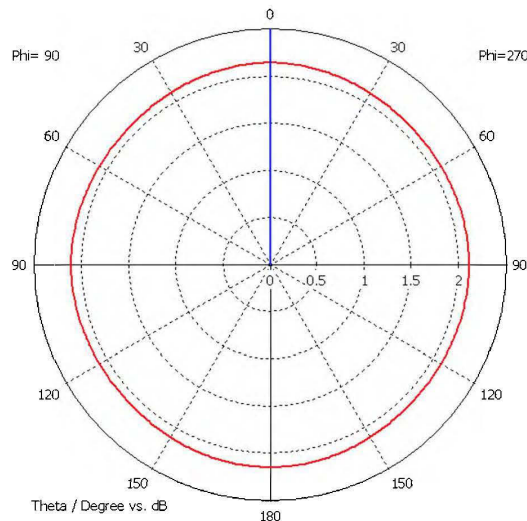
L'élément rayonnant dans une antenne Yagi-Uda est le dipôle montré sur la figure 4.1



**Figure 4.1:** Structure d'une antenne dipôle.

Cette antenne, étant donné les dimensions optimisées, résonne dans la fréquence 5.8 GHz avec un gain réalisé de 2.41 dBi.

Le diagramme de rayonnement de cet élément est omnidirectionnel, i.e. il rayonne dans toutes les directions de façon uniforme comme le montre la figure 4.2



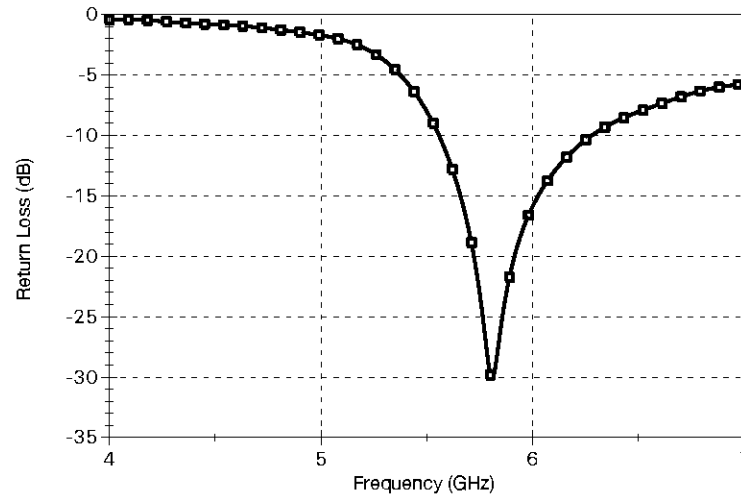
**Figure 4.2:** Diagramme de rayonnement de l'antenne dipôle.

### Réflecteur et directeur

Un élément métallique placé à une certaine distance de l'élément rayonnant peut jouer le rôle d'un réflecteur ou bien d'un directeur suivant sa longueur. Autrement dit, il joue le rôle d'un réflecteur si la longueur est supérieure à celle du dipôle et d'un directeur dans le cas inverse.

#### 4.2.2 Optimisation de l'antenne référence

Les trois éléments de cette antenne sont placés sur un matériau avec une constante diélectrique  $\epsilon_r \approx 1$ . Cette antenne a été optimisée pour fonctionner dans la fréquence 5.8 GHz. Son coefficient de réflexion  $S_{11}$  est représenté dans la Fig. 4.3



**Figure 4.3:** Structure de l'antenne référence optimisée.

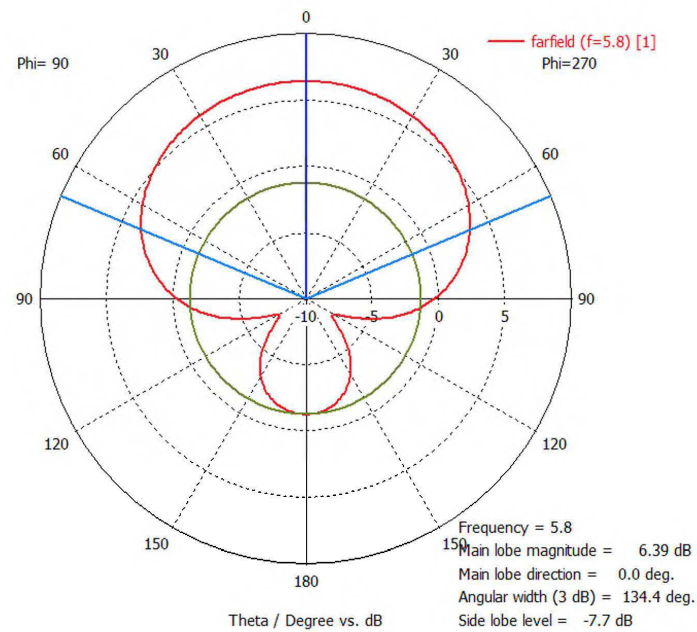
Cette structure possède un diagramme de rayonnement directif avec un gain réalisé de 7.91 dBi comme le montre la Fig. 4.4

Les longueurs optimisées du réflecteur, dipôle et directeur sont  $0.46\lambda$ ,  $0.40\lambda$  et  $0.35\lambda$ , respectivement. Le tableau 4.1 résume les paramètres utilisés.

**Tableau 4.1:** Tableau résumant les paramètres optimisés de l'antenne Yagi-Uda.

Paramètre	$L$	$W$	$s$	$h_{ref}$	$h_{dir}$	$L_{ref}$	$L_{dir}$
Valeur (mm)	20.81	2	1	12	15	24	18

On note que ces paramètres donnent la meilleure combinaison du gain et de coefficient de réflexion.



**Figure 4.4:** Simulation du diagramme de rayonnement de l'antenne référence.

#### 4.3 Application de l'algorithme génétique

L'algorithme génétique est basé sur le principe de sélection naturelle. Dans plusieurs études, il a été utilisé pour l'optimisation des paramètres de l'antenne. Dans d'autres études [28-31], il a été utilisé pour trouver une nouvelle géométrie de l'antenne en la subdivisant en plusieurs éléments rectangulaires qu'on appellera des pixels. Dans notre cas, les paramètres (longueurs et largeurs des différents éléments) sont déjà optimisés. Pour cela, on essayera de trouver une nouvelle structure en choisissant une partie de l'antenne et en la subdivisant en pixels. Le choix de la subdivision doit se faire dans un endroit où la densité surfacique de courant est élevée afin de pouvoir interférer avec le fonctionnement de l'antenne dans la fréquence de rayonnement. On distingue trois emplacements possibles pour la subdivision selon ce critère :

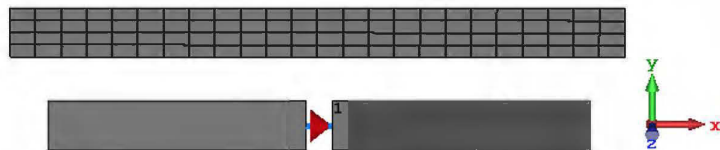
- Sur le dipôle
- Sur le réflecteur

#### — Sur le directeur

On ne traitera pas le cas du dipôle car on veut garder la fréquence de résonance tout en augmentant le gain de l'antenne.

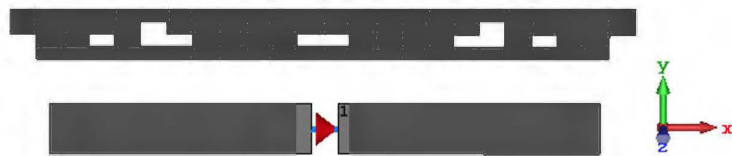
##### 4.3.1 Sur le réflecteur

Afin d'améliorer le gain de l'antenne Yagi-Uda, on peut choisir la subdivision sur le réflecteur puis l'optimiser en termes de gain et de  $S_{11}$ . Les pixels sont de longueur 1 mm et de largeur 0.5 mm, ce qui donne une subdivision de  $24 \times 4$  pixels. Cette subdivision est symétrique par rapport au plan xoz. La Fig. 4.5 montre la subdivision proposée.



**Figure 4.5:** Structure du réflecteur de l'antenne Yagi-Uda subdivisée.

Après application de l'AG, le résultat de l'optimisation est montré sur la Fig. 4.6

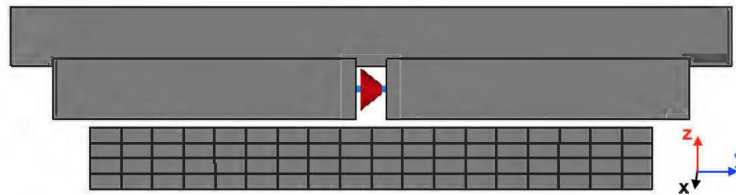


**Figure 4.6:** Structure du réflecteur de l'antenne Yagi-Uda optimisée.

##### 4.3.2 Sur le directeur

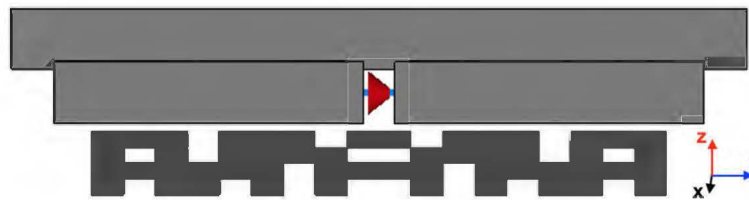
La deuxième possibilité est de choisir la subdivision sur le directeur puis de l'optimiser en termes de gain et de pertes de retour  $S_{11}$ . Les pixels sont de

longueur 1 mm et de largeur 0.5 mm ce qui donne une subdivision de  $9 \times 4$  pixels dans chaque côté symétrique par rapport au plan xoz. La Fig. 4.7 montre la subdivision.



**Figure 4.7:** Structure du directeur de l'antenne Yagi-Uda subdivisée.

Après application de l'AG, le résultat de l'optimisation est montré sur la Fig. 4.8  
Structure du directeur de l'antenne Yagi-Uda optimisée



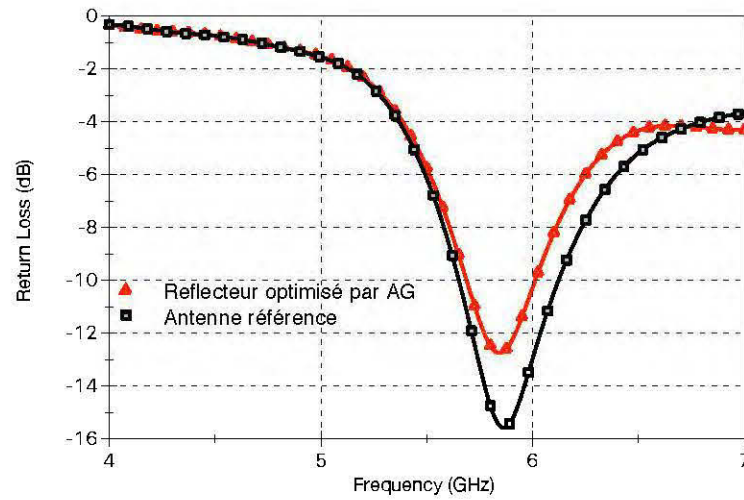
**Figure 4.8:** Structure du directeur de l'antenne Yagi-Uda optimisée.

#### 4.4 Résultats de simulation

##### 4.4.1 Cas du réflecteur

Les simulations ont été effectuées en utilisant le logiciel de simulation CST Studio Suite. La simulation de l'antenne obtenue par l'AG donne le résultat pour le coefficient qui est ensuite comparé au résultat trouvé pour l'antenne avant l'optimisation génétique, voire Fig. 4.9.

En utilisant le même logiciel, on a trouvé le diagramme de rayonnement de l'antenne avant et après optimisation par l'AG.

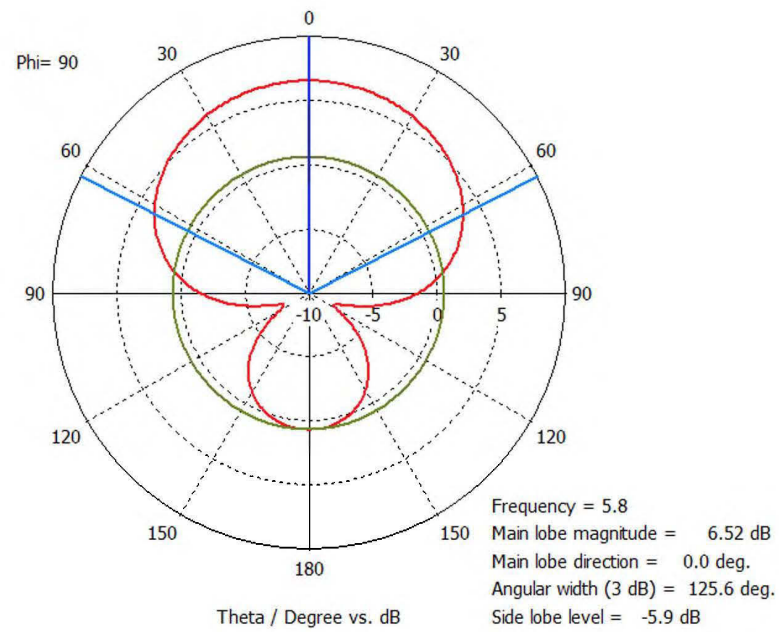


**Figure 4.9:** Coefficient de réflexion  $S_{11}$  de l'antenne Yagi-Uda avant et après optimisation par l'AG.

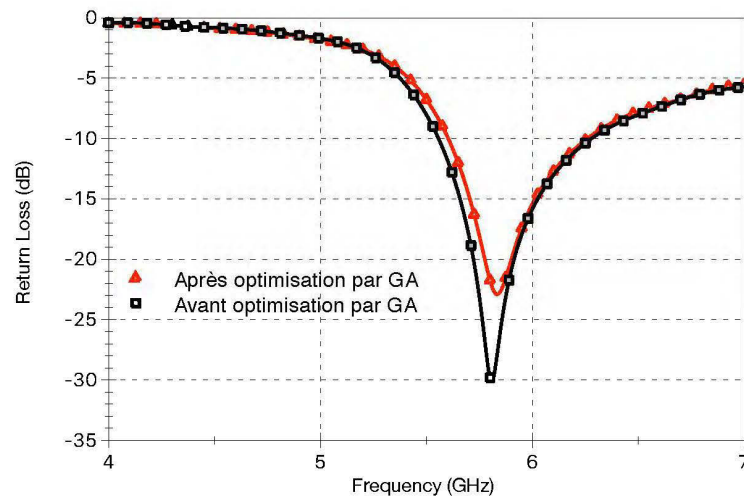
#### 4.4.2 Cas du directeur

Le résultat de comparaison du coefficient de réflexion de l'antenne avant et après optimisation de l'antenne par l'AG est donné dans la Fig. 4.11.

En utilisant le même logiciel, on a trouvé le diagramme de rayonnement de l'antenne avant et après optimisation par l'AG, voir Fig. 4.12

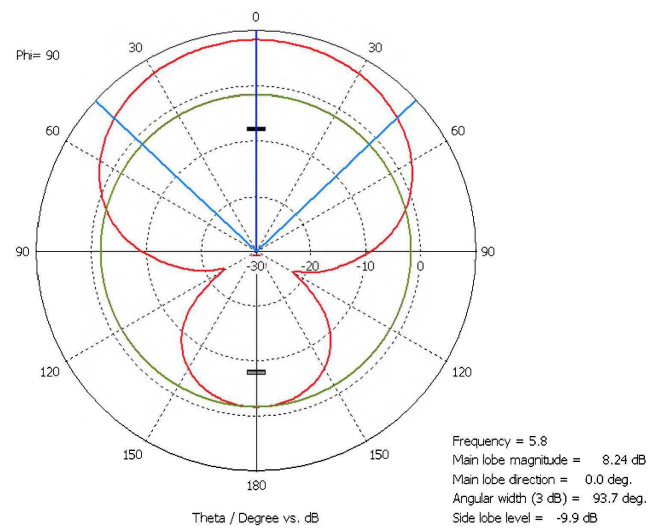


**Figure 4.10:** Diagramme de rayonnement du gain réalisé de l'antenne Yagi-Uda après optimisation par l'AG



**Figure 4.11:** Simulation du coefficient de réflexion  $S_{11}$  de l'antenne Yagi-Uda avant et après optimisation par l'AG.



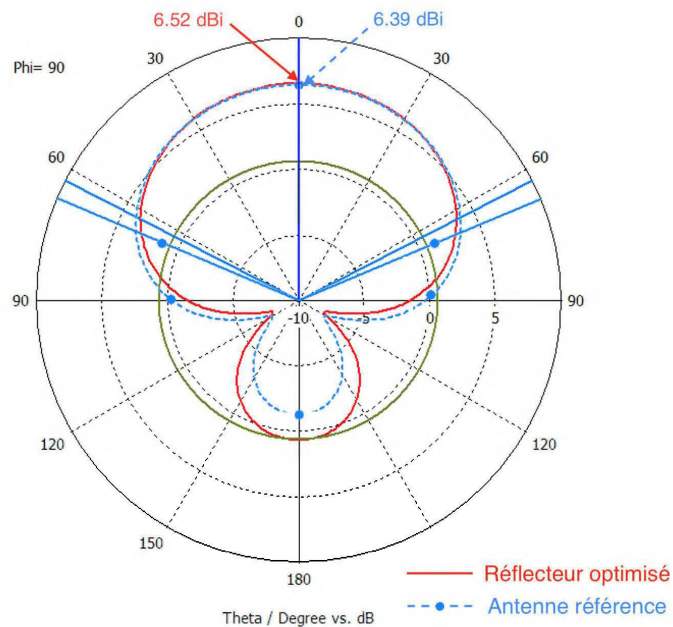


**Figure 4.12:** Simulation du diagramme de rayonnement du gain réalisé de l'antenne Yagi-Uda après optimisation par l'AG.

## 4.5 discussion

### 4.5.1 Optimisation du réflecteur

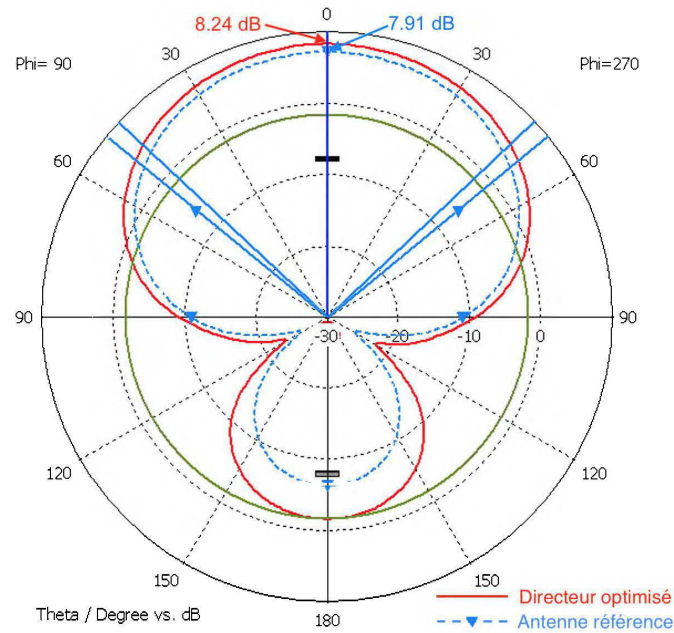
D'après la Fig. 4.13, on remarque une diminution dans le gain réalisé de l'antenne.



**Figure 4.13:** Diagramme de rayonnement du gain réalisé de l'antenne Yagi-Uda avant et après optimisation du réflecteur par l'AG.

### 4.5.2 Optimisation du directeur

D'après la Fig. 4.14, on remarque une augmentation de 0.33 dBi dans le gain réalisé de l'antenne. Cette augmentation -même si petite- montre qu'on n'a pas atteint le gain maximum seulement en utilisant les méthodes classiques. Le gain de l'antenne optimisée est donc 8.24 dBi.



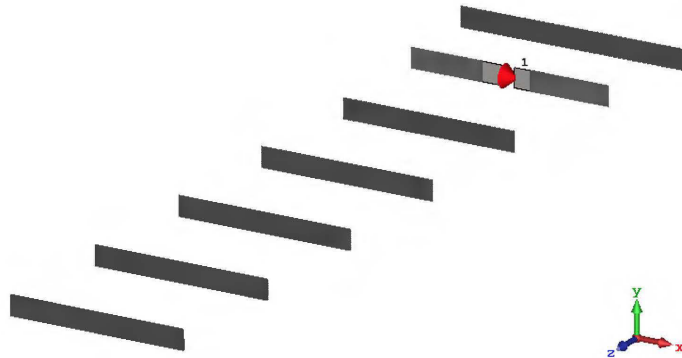
**Figure 4.14:** Diagramme de rayonnement du gain réalisé de l'antenne Yagi-Uda avant et après optimisation du directeur par l'AG.

#### 4.6 Généralisation pour plusieurs directeurs

Une antenne Yagi-Uda est généralement formée d'un élément rayonnant, d'un réflecteur et de plusieurs directeurs. Si on considère la contribution de l'AG dans chacun des directeurs, on arrivera à une contribution assez importante dans le gain.

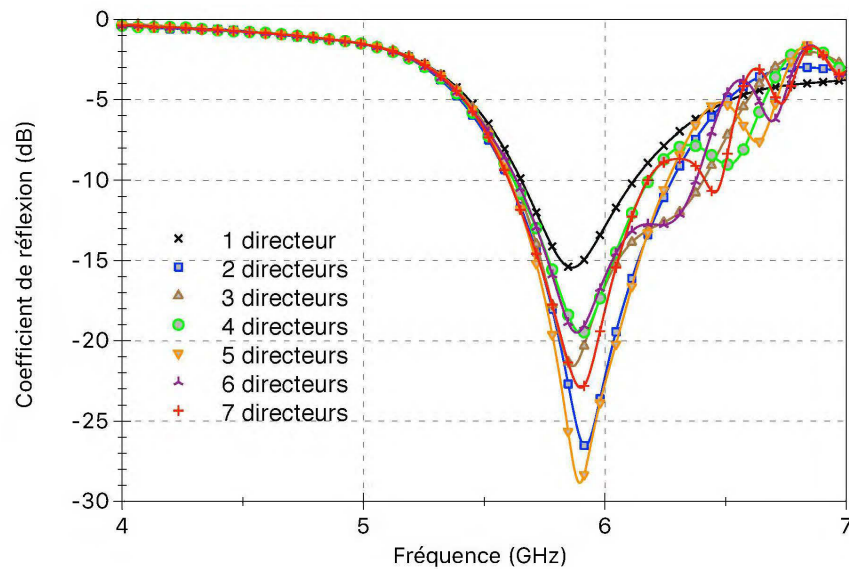
Pour cela, on va étudier l'impact de l'utilisation de plusieurs directeurs sur le gain et sur le coefficient de réflexion. La figure 4.15 montre le cas d'utilisation de 5 directeurs.

On va effectuer dans la suite une étude comparative entre l'utilisation des directeurs complets et l'utilisation des directeurs modifiés par l'AG. On fera le balayage de 1 à 7 directeurs.

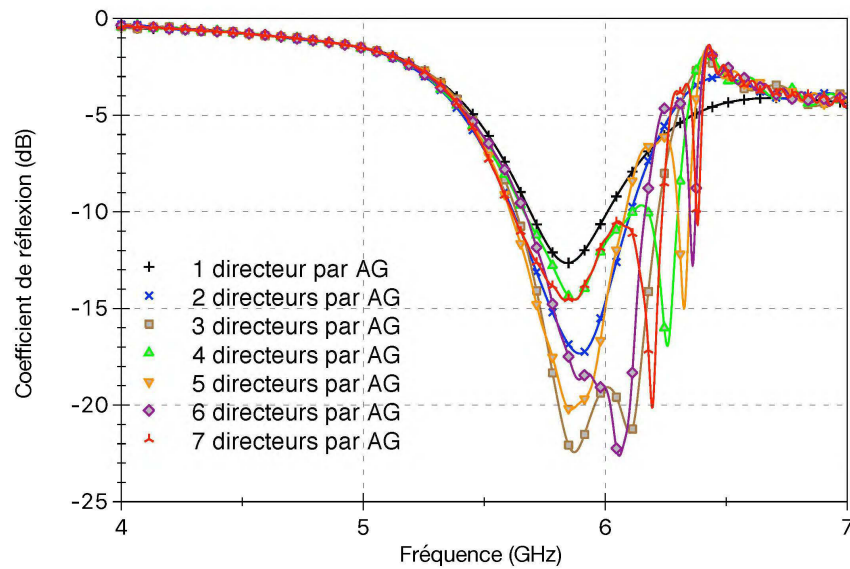


**Figure 4.15:** Conception de l'antenne avec 5 directeurs.

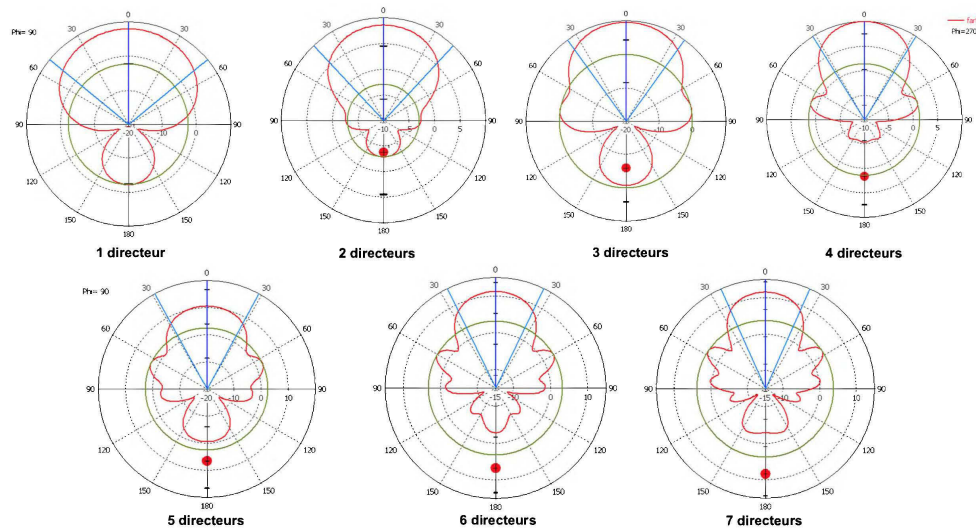
Le résultat de la simulation du coefficient de réflexion des antennes avec des directeurs complets est montré sur les figures 4.16. Par contre, le résultat dans le cas des directeurs modifiés par l'AG est montré sur les figures 4.17.



**Figure 4.16:** Résultat de la simulation du coefficient de réflexion des antennes avec des directeurs complets.



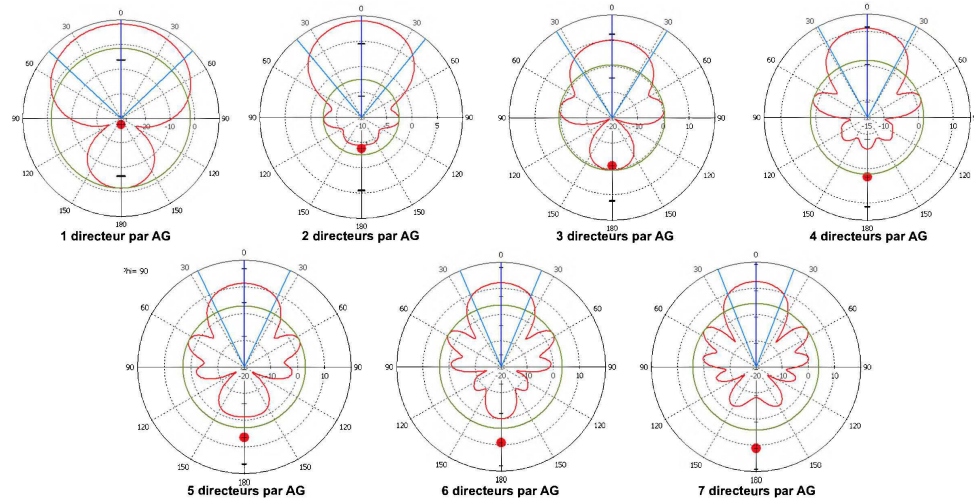
**Figure 4.17:** Résultat de simulation du coefficient de réflexion des antennes avec des directeurs modifiés par l'AG.



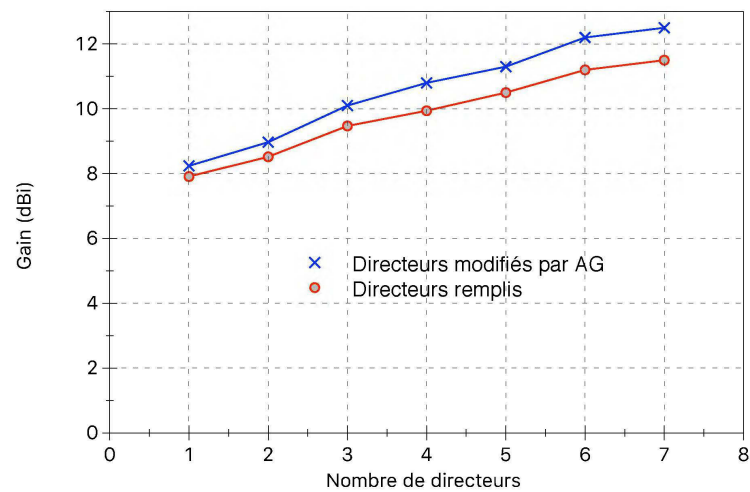
**Figure 4.18:** Résultat de simulation du diagramme de rayonnement du gain réalisé des antennes avec des directeurs complets.

De même, on a effectué les simulations sur le gain avant et après modification des directeurs. Figure 4.18 montre le diagramme de rayonnement avant la modification par l'AG et la figure 4.19 montre le diagramme de rayonnement après

la modification par l'AG.



**Figure 4.19:** Résultat de la simulation du diagramme de rayonnement du gain réalisé des antennes avec des directeurs modifiés par l'AG.



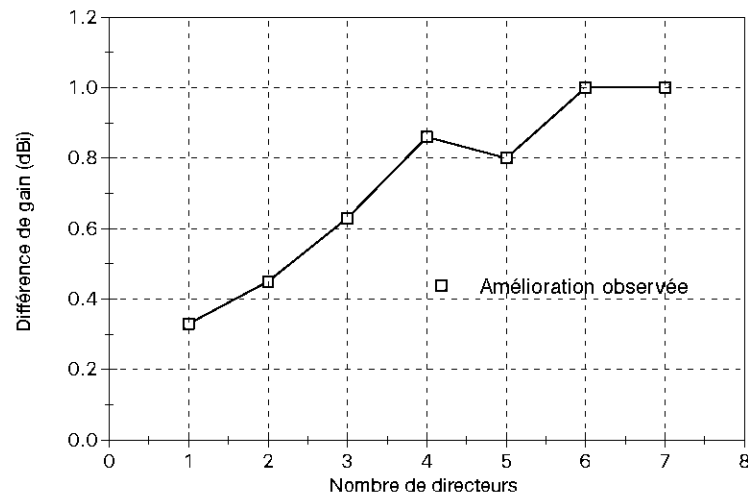
**Figure 4.20:** Résultat de la simulation du gain réalisé avant et après modification des directeurs par l'AG.

Le tableau 4.2 résume les résultats de gain trouvés et la figure 4.20 les représente .

L'amélioration dans le gain après l'introduction de l'AG est montrée sur la figure 4.21.

**Tableau 4.2:** Tableau résumant les paramètres optimisés de l'antenne Yagi-Uda.

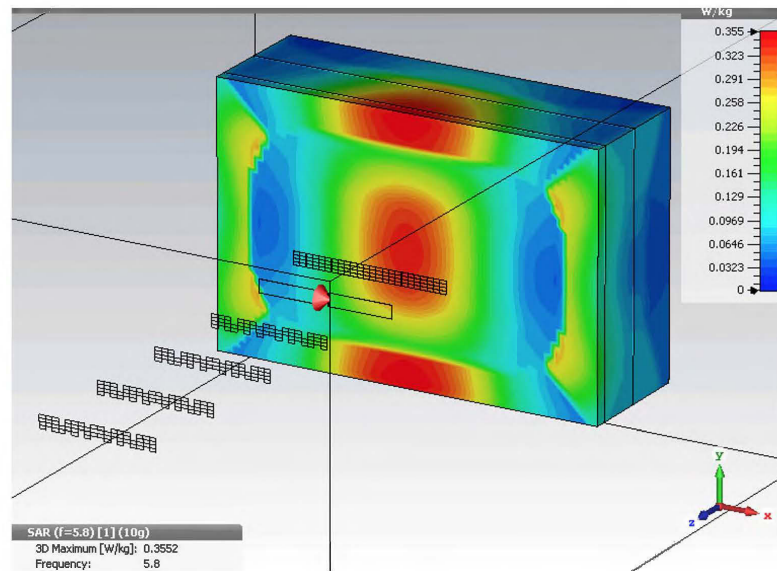
Nbre des directeurs	Avant modification par AG (dBi)	Après modification par AG (dBi)	Différence (dBi)
1	7.91	8.24	0.33
2	8.52	8.97	0.45
3	9.47	10.1	0.63
4	9.94	10.8	0.86
5	10.5	11.3	0.8
6	11.2	12.2	1
7	11.5	12.5	1

**Figure 4.21:** Résultat de la simulation de la différence dans le gain après l'introduction des directeurs modifiés par l'AG.

#### 4.6.1 Etude SAR

D'après l'étude effectuée dans la section précédente, on remarque que l'antenne avec le meilleur compromis entre taille et gain réalisé est celle avec 4 directeurs. Pour cette antenne bien particulière, on a effectué une étude du débit d'absorption spécifique afin de protéger les utilisateurs des méfaits de rayonnement. Les résultats de simulation obtenus par le logiciel CST Microwave Studio sont montrés sur la figure 4.22.





**Figure 4.22:** Résultat de la simulation du SAR pour l'antenne avec 4 directeurs modifiés par l'AG.

On remarque que le niveau du SAR est très faible (0.36 W/Kg) en comparaison avec la norme de 1.6 W/Kg.

Il est à noter que le modèle du corps humain utilisé est le même que celui discuté dans la section 3.4.1.

#### 4.7 Conclusion

Dans cette partie, on a augmenté le gain d'une antenne Yagi-Uda par 0.33 dBi en utilisant l'AG. De même, on a utilisé plusieurs directeurs ce qui nous a permis d'augmenter le gain par 0.86 dBi pour seulement 4 directeurs. Donc, l'AG peut être utilisé pour l'amélioration du gain d'antennes utilisées dans les systèmes de communication sans fil. On a aussi montré que l'emplacement de la subdivision de l'antenne est important et doit être choisie judicieusement.



## CHAPITRE V

### CONCLUSION GÉNÉRALE

Les antennes off-body portables sur les vêtements sont de plus en plus utilisées dans les réseaux WBAN. Dans le domaine minier, ces antennes peuvent faciliter la détection des facteurs constituant un risque pour la santé des mineurs. Ce qui peut diminuer le temps de réponse en cas d'urgences.

Dans le présent travail, on a appliqué deux techniques d'alimentation des antennes dipôles dans deux cas différents. A savoir, une alimentation Balun et une alimentation par ligne microruban. Ensuite, on a présenté la démarche suivie lors de la conception d'une antenne dipôle avec une surface AMC. Cette antenne présente un diagramme de rayonnement directif avec un gain réalisé de plus de 6 dBi. L'utilisation de la surface AMC en combinaison avec le plan de masse isole bien le corps humain. D'où, le niveau SAR très faible, ce qui est conforme avec la norme précisant le niveau SAR maximum permis de 1.6 W/Kg. Les paramètres de cette antenne sont stables après courbure sur le bras humain. Ainsi, cette antenne peut être utilisée dans les réseaux de communication sans fil.

Finalement, on a amélioré le gain d'une antenne Yagi-Uda déjà optimisée par les méthodes classiques. On a obtenu une augmentation de 0.13 dBi dans le cas du directeur et par 0.33 dBi dans le cas du réflecteur en utilisant l'algo-

rithme génétique. On a aussi effectué les tests pour plusieurs directeurs, ce qui a donné une amélioration dans le gain réalisé de 0.86 dBi pour 4 directeurs. Donc, l'algorithme génétique peut être utilisé pour l'amélioration du gain d'antennes même dans le cas où on a atteint un maximum de performances possible par les méthodes classiques. Pour cela, les antennes proposées sont des bons candidats pour l'utilisation dans des systèmes de communication sans fil dans le milieu minier.

## RÉFÉRENCES

- [1] A. Habani, “Étude, conception et réalisation des antennes à polarisation linéaire/circulaire pour les communications corporelles dans les mines souterraines,” 2018.
- [2] K. Huang, *On Wireless Local Area Networks*. PhD thesis, National University of Ireland Maynooth, 2010.
- [3] “Computer network of an office.” <https://www.conceptdraw.com/How-To-Guide/computer-network-of-an-office>. Accessed : 2019-05-05.
- [4] T. Jaiaree, “The security aspects of wireless local area network (wlan),” tech. rep., NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL MONTEREY CA, 2003.
- [5] T. Sansanayuth, “Development of a wireless interface for fitting, training, and monitoring of advanced prosthetic limbs,”
- [6] H. Xiaomu, S. Yan, and G. A. Vandenbosch, “Wearable button antenna for dual-band wlan applications with combined on and off-body radiation patterns,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 3, pp. 1384–1387, 2017.
- [7] A. Alomainy, Y. Hao, A. Owadally, C. G. Parini, Y. Nechayev, C. C. Constantinou, and P. S. Hall, “Statistical analysis and performance evaluation for on-body radio propagation with microstrip patch antennas,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 1, pp. 245–248, 2007.

- [8] M. Suma, P. Bybi, and P. Mohanan, "A wideband printed monopole antenna for 2.4-ghz wlan applications," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 48, no. 5, pp. 871–873, 2006.
- [9] N. Haga, K. Saito, M. Takahashi, and K. Ito, "Characteristics of cavity slot antenna for body-area networks," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 4, pp. 837–843, 2009.
- [10] A. Zeghdoud and M. Nedil, "Off-body dipole antenna with dogbone-shaped amc bending on the human arm." submitted.
- [11] M. Zada and H. Yoo, "A miniaturized triple-band implantable antenna system for bio-telemetry applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 12, pp. 7378–7382, 2018.
- [12] X. Tong, C. Liu, H. Guo, and X. Liu, "A triple-mode reconfigurable wearable repeater antenna for wban applications," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 29, no. 3, p. e21615, 2019.
- [13] A. Habani, M. Nedil, T. A. Denidni, and L. Talbi, "High gain enhancement off-body antenna for underground mining communications," in *2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, pp. 2167–2168, IEEE, 2017.
- [14] P. J. Soh, G. A. Vandenbosch, S. L. Ooi, and N. H. M. Rais, "Design of a broadband all-textile slotted pifa," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 1, pp. 379–384, 2012.
- [15] C. A. Balanis, *Antenna theory : analysis and design*. John wiley & sons, 2016.
- [16] C. Y. Chu, *Printed dipole antenna design for wireless communications*. PhD thesis, McGill University Libraries, 2005.

- [17] A. Vallecchi, J. R. De Luis, F. Capolino, and F. De Flaviis, "Low profile fully planar folded dipole antenna on a high impedance surface," *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 60, no. 1, pp. 51–62, 2012.
- [18] Y. Qian, W. R. Deal, N. Kaneda, and T. Itoh, "Microstrip-fed quasi-yagi antenna with broadband characteristics," *Electronics Letters*, vol. 34, no. 23, pp. 2194–2196, 1998.
- [19] H. Ayad, M. Fadlallah, H. Youssef, H. Elmokdad, F. Ndagijimana, and J. Jomaah, "Performances of low profile dipole antenna amc-based surface using metamaterials structures," in *2012 19th International Conference on Telecommunications (ICT)*, pp. 1–5, IEEE, 2012.
- [20] H. Ayad, M. Fadlallah, H. Youssef, H. Elmokdad, F. Ndagijimana, and J. Jomaah, "Performances of low profile dipole antenna amc-based surface using metamaterials structures," in *2012 19th International Conference on Telecommunications (ICT)*, pp. 1–5, IEEE, 2012.
- [21] N. A. Abbasi and R. Langley, "A wideband printed monopole antenna over dual-band amc," in *2010 Loughborough Antennas & Propagation Conference*, pp. 221–224, IEEE, 2010.
- [22] G. Q. Luo, Z. Z. Song, X. H. Zhang, and X. P. Hu, "Millimeter wave on chip antenna using dogbone shape artificial magnetic conductor," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2013, 2013.
- [23] H. Mohammed, F. Abdulsalam, A. Abdulla, R. Ali, R. Abd-Alhameed, J. Noras, Y. Abdulraheem, A. Ali, J. Rodriguez, and A. M. Abdalla, "Evaluation of genetic algorithms, particle swarm optimisation, and firefly algorithms in antenna design," in *2016 13th International Conference on Synthesis*,

*Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD)*, pp. 1–4, IEEE, 2016.

- [24] P. Werner and D. Werner, “A design optimization methodology for multi-band stochastic antennas,” in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (IEEE Cat. No. 02CH37313)*, vol. 2, pp. 354–357, IEEE, 2002.
- [25] P. Nepa and H. Rogier, “Wearable antennas for off-body radio links at vhf and uhf bands : Challenges, the state of the art, and future trends below 1 ghz.,” *IEEE antennas and Propagation Magazine*, vol. 57, no. 5, pp. 30–52, 2015.
- [26] Y. Rahmat-Samii, “Genetic algorithm (ga) and particle swarm optimization (pso) in engineering electromagnetics,” in *17th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications, 2003. ICECom 2003.*, pp. 1–5, IEEE, 2003.
- [27] K. Fertas, “Contribution à l’optimisation de la synthèse des antennes microstrips par les algorithmes génétiques.,” Master’s thesis, Ecole Militaire Polytechnique, 2014.
- [28] M. C. Derbal, A. Zeghdoud, and M. Nedil, “A novel dual band antenna design for wifi applications using genetic algorithms,” in *2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, pp. 1009–1010, IEEE, 2018.
- [29] K. Fertas, H. Kimouche, M. Challal, H. Aksas, and R. Aksas, “Multiband microstrip antenna array for modern communication systems,” in *2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, pp. 1–5, IEEE, 2015.

- [30] A. Zeghdoud, M. C. Derbal, and M. Nedil, "A novel uwb antenna for wireless communication systems using genetic algorithms." submitted.
- [31] L. Xie, Y.-C. Jiao, and G. Zhao, "A compact band-notched uwb slot antenna optimized by genetic algorithm," in *2011 IEEE International Conference on Microwave Technology & Computational Electromagnetics*, pp. 313–315, IEEE, 2011.
- [32] M. John and M. J. Ammann, "Wideband printed monopole design using a genetic algorithm," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 6, pp. 447–449, 2007.
- [33] A. Habani, M. Nedil, T. A. Denidni, and L. Talbi, "High gain enhancement off-body antenna for underground mining communications," in *2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, pp. 2167–2168, IEEE, 2017.
- [34] G. Q. Luo, Z. Z. Song, X. H. Zhang, and X. P. Hu, "Millimeter wave on chip antenna using dogbone shape artificial magnetic conductor," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2013, 2013.
- [35] B.-K. Tan, S. Withington, and G. Yassin, "A compact microstrip-fed planar dual-dipole antenna for broadband applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 593–596, 2015.
- [36] U. Ali, S. Ullah, J. Khan, M. Shafi, B. Kamal, A. Basir, J. A. Flint, and R. D. Seager, "Design and sar analysis of wearable antenna on various parts of human body, using conventional and artificial ground planes," 2017.
- [37] K.-L. Wong, W.-J. Wei, and L.-C. Chou, "Wwan/lte printed loop tablet computer antenna and its body sar analysis," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 53, no. 12, pp. 2912–2919, 2011.

- [38] C. A. Balanis, *Antenna theory : analysis and design*. John wiley & sons, 2016.
- [39] Y. Ge, K. P. Esselle, and Y. Hao, "Design of low-profile high-gain ebg resonator antennas using a genetic algorithm," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 6, pp. 480–483, 2007.